

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**



**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА**

**1 - 2 (23 - 24)**

**Донецк – 2021**

УДК 004.3+004.9+004.2+51.7+519.6+519.7

**ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА**, № 1 - 2 (23 - 24), 2021,  
Донецк, ДонНТУ.

Выпуск подготовлен по материалам XII Международной научно-технической конференции «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование – 2021» (ИУСМКМ–2021), проведенной 26 – 27 мая 2021 г. в рамках VII Международного Научного форума Донецкой Народной Республики и посвященной 100-летию ДонНТУ.

Представлены наиболее интересные материалы по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения в области информатики, кибернетики, вычислительной техники и инженерного образования.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

**Главный редактор:** Павлыш В. Н., д.т.н., проф.

**Зам. глав. ред.:** Мальчева Р. В., к.т.н., доц.

**Ответственный секретарь:** Воронова А. И.

**Члены редакционной коллегии:** Аверин Г. В., д.т.н., проф.; Аноприенко А. Я., к.т.н., проф.;  
Зинченко Ю. Е., к.т.н., доц.; Зори С. А., д.т.н., доц.; Карабчевский В. В., к.т.н., доц.;  
Привалов М. В., к.т.н., доц.; Скобцов Ю. А., д.т.н., проф.; Федяев О. И., к.т.н., доц.;  
Шелепов В. Ю., д.ф.-м.н., проф.

Рекомендовано к печати ученым советом ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки ДНР. Протокол № 3 от 30 апреля 2021 г.

Свидетельство о регистрации СМИ: серия ААА № 000145 от 20.06.2017.

Приказ МОН ДНР № 135 от 01.02.2019 о включении в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК ДНР.

Контактный адрес редакции

ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,

4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.

Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11

Эл. почта: [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru)

Интернет: <http://infcyb.donntu.org>

© Донецкий национальный технический университет  
Министерство образования и науки ДНР, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

<b>Приветственное слово Ректора ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» Аноприенко Александра Яковлевича участникам и гостям XII Международной научно-технической конференции «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование – 2021»</b> <i>Аноприенко А. Я.</i> .....	5
<b>Поздравление ДонНТУ со 100-летием от выпускниц факультета КНТ Ольги и Татьяны Гранкиных</b> <i>Гранкина О. О., Гранкина Т. О.</i> .....	8
<b>Поздравление ДонНТУ со 100-летием от выпускника факультета КНТ 1999 г. Привалова Максима</b> <i>Привалов М. В.</i> .....	11

Информатика и вычислительная техника

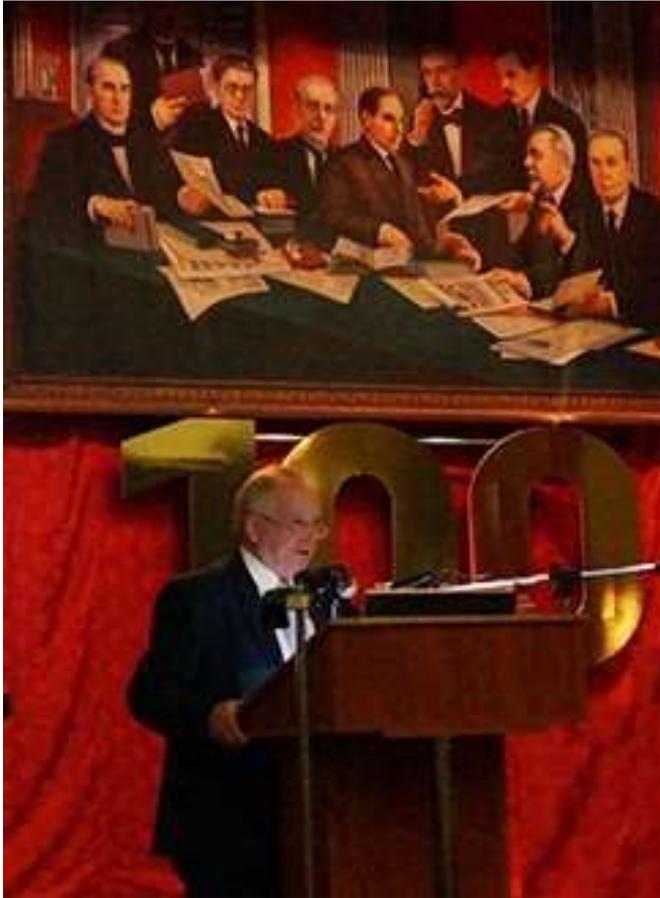
<b>Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры</b> <i>Аноприенко А. Я., Койбаш А. А., Максименко Н. С., Сидоров К. А.</i> .....	14
<b>Опыт участия в международных соревнованиях по анализу данных как способ стимулирования исследовательских навыков обучающихся</b> <i>Багаев И. В., Канищев И. С., Охапкин В. П., Шатров А. В.</i> .....	22
<b>Нечеткая искусственная нейронная сеть без правил в системе управления установкой обработки воды электромагнитным полем</b> <i>Бизянов Е. Е., Погорелов Р. Н.</i> .....	34
<b>Математическое моделирование и анализ параметров процесса пневматической обработки угольного пласта</b> <i>Лазебная Л. А.</i> .....	39
<b>Натурная модель вентиляционной сети шахты для реализации системы автоматизированного управления технологическим процессом проветривания шахты</b> <i>Неежмаков С. В., Ткаченко А. Е., Немов Г. Ю.</i> .....	45
<b>Математическое моделирование и автоматизация управления процессом динамического воздействия на многокомпонентные массы</b> <i>Перинская Е. В.</i> .....	53
<b>Поиск ключевых точек лица для задачи распознавания эмоций</b> <i>Семёнова А. П., Павлыш В. Н.</i> .....	59
<b>Анализ данных телеметрии и надежности малых космических аппаратов</b> <i>Скобцов В. Ю.</i> .....	65

Компьютерные науки

<b>Использование геометрических интерполянтов для численного решения уравнения Лапласа в прямоугольнике</b> <i>Шевчук О. А.</i> .....	74
--	----

Инженерное образование

<b>Управление сложностью подачи учебного материала на занятии на основе компьютерной модели нечетких множеств</b> <i>Коляда М. Г., Бугаева Т. И.</i> .....	81
<b>Современные информационные технологии в ресурсном обеспечении научно-технической библиотеки вуза</b> <i>Приходченко Е. И., Кулькова О. В.</i> .....	90
<b>Подготовка специалистов по сетевым технологиям на основе образовательного продукта D-Link в условиях инновационного развития Донбасса</b> <i>Ромасевич П. В., Смирнова Е. В.</i> .....	96
<b>От генетических алгоритмов к метаэвристикам</b> <i>Скобцов Ю. А.</i> .....	101
<b>Исследование переходных процессов в системе управления проветриванием угольных шахт в выемочных участках минимально-фазового типа</b> <i>Чередникова О. Ю., Достлев Ю. С.</i> .....	108
<u>Об авторах</u> .....	115
<u>Требования к статьям, направляемым в редакцию научного журнала «Информатика и кибернетика»</u> .....	117



## ПРИВЕТСТВЕННОЕ

### СЛОВО

**Ректора ГОУВПО  
«Донецкий национальный  
технический университет»**

**Аноприенко Александра  
Яковлевича**

участникам и гостям XII  
Международной научно-  
технической конференции  
«Информатика, управляющие  
системы, математическое и  
компьютерное моделирование  
– 2021» (ИУСМКМ–2021)

XII Международная научно-техническая конференция «Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование – 2021» (ИУСМКМ–2021), проводимая в рамках VII Международного Научного форума Донецкой Народной Республики, **в этом году посвящена сразу трём знаменательным датам:** во-первых, 300-летию Донбасса, во-вторых, 100-летию ДонНТУ и, в-третьих, 60-летию компьютерных наук и технологий в ДонНТУ.

**300-летие Донбасса** принято отсчитывать от 1721 года, когда были открыты первые значимые месторождения угля недалеко от нынешнего города Шахты Ростовской области (первой государственной экспедицией по разведке недр Донецкого бассейна под руководством Григория Капустина, организованной по указу Петра I), а также в урочище Скелеватом в 30 км на восток от города Бахмута (Артемовска), где уже через несколько лет началась промышленная добыча угля для нужд солеваренного завода и работало 150 шахтеров. Это стало началом становления Донбасса как индустриального региона, ориентированного в первую очередь на добычу угля и производство металла.

**100-летие ДонНТУ** также связано с новым этапом в становлении современного Донбасса: открытие в 1921 году в самом центре индустриального края первого высшего учебного заведения ознаменовало, фактически, начало его интеллектуальной истории. С первых же лет своей

истории профессорско-преподавательский коллектив первого донецкого вуза начал активно заниматься не только учебной работой, но и научно-исследовательской, что позволило в кратчайшие сроки реально превратить вчерашний рабочий посёлок Юзовку в полноценный современный город со всей необходимой инфраструктурой. Но главным результатом этой работы стала ускоренная индустриализация и электрификация Донбасса.

**В 1961-м году** в истории и ДонНТУ, и Донбасса начался новый этап: компьютерный! И, по-видимому, не случайно первое реальное использование электронной вычислительной техники в нашем вузе (а по сути в Донбассе вообще) 12 апреля день в день и даже час в час совпало с прорывом человечества в космос – это стало своего рода знаком, что ДонНТУ тогда вступил в новую эпоху, символами которой являются космические и компьютерные технологии, в первую очередь определяющие в настоящее время наше ближнее и дальнее будущее. Именно этому посвящен мой доклад «Программная и компьютерная инженерия в контексте интеллектуализации техносферы: динамика развития и закономерности, определяющие будущее», продолжающий по сути тему, начатую на X конференции ИУСКМ в 2019 году («Интеллектуализация техносферы: закономерности и перспективы») и ИУСКМ-2014 («Система закономерностей развития средств и методов компьютеринга»).

Особо следует отметить активное участие в нынешней конференции учёных целого ряда российских вузов и организаций. И в первую очередь хотелось бы выразить отдельную благодарность профессору кафедры «Высшая математика № 1» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» почётному доктору ДонНТУ Кожухову Игорю Борисовичу, который с 2015 года принимает активнейшее участие в конференциях ИУСКМ и как организатор, и как докладчик.

В юбилейный год в работе конференции приняли участие и выпускники факультета КНТ ДонНТУ, работающие в настоящее время далеко за пределами ДНР. Среди них отдельно следует отметить выпускниц-отличниц бакалавриата ДонНТУ Ольгу и Татьяну Гранкиных, которые поступив в магистратуру Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, не только закончили её с отличием, но и в период обучения стали президентскими стипендиатами. Они не только приняли непосредственное участие в работе конференции и выступили с докладами (дистанционно), но и направили в адрес родного вуза очень тёплые поздравления с юбилеем.

К 100-летию ДонНТУ был подготовлен целый ряд юбилейных изданий, а также – модульная инфографика, посвященная каждому из десятилетий нашей славной истории. Модуль первого десятилетия открывает данный сборник как напоминание о том, как всё начиналось.

# Донецкий национальный технический университет 1921-1931 годы ДОНЕЦКИЙ ГОРНЫЙ ТЕХНИКУМ (1921-1926 гг.)

Центральное правление каменноугольной промышленности  
Приказ от 9 января 1921 г.

Организовать в Юзовке пролетарский Донецкий горный техникум для подготовки из передовых рабочих высококвалифицированных кадров для ведущих отраслей промышленности Донбасса.  
Председатель Центрального правления каменноугольной промышленности Ф. Артем (Сергеев)



**И.М. Пугач**  
Ректор Донецкого горного техникума и Донецкого горного института (1921-1930 гг.)



**Основатели Донецкой политехнической школы**  
профессора А.В. Рязанов, А.Н. Давыдов, С.В. Чернышев, А.И. Пуляев, ректор И.М. Пугач, А.М. Порушилин, П.Д. Шевяков, Н.И. Ромодановский, В.И. Висло



**Факультеты:**  
- горный;  
- горно-механический;  
- рабфак;  
- Высшие инженерные курсы;  
- Вечерний металлургический техникум.

**Специальности:**  
- горный инженер по эксплуатации горных месторождений;  
- горный инженер-шахтостроитель;  
- горный инженер по обогащению полезных ископаемых;  
- горный инженер-электротехник;  
- горный инженер по инжинирингу.



Учебный корпус Донецкого горного техникума (бывшее каменноугольное училище)



Горный корпус (1922-1924 гг.) (здание г.и. «Братской школы»)



Химический корпус (1924-1949 гг.) (бывшее здание Института химии, центра детского и юношеского творчества)



Библиотека Донецкого горного техникума

## Первые преподаватели и студенты Донецкого горного техникума



Преподаватели ДГТ



Ректор И.М. Пугач и руководители общественных организаций (бывшие члены профсоюза «Корпус») в здании ДГТ



Руководство ДГТ и студенты Высших инженерных курсов



Первый выпуск ДГТ



Студенты рабфака

## ДОНЕЦКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ (1926-1935 гг.)

**ВЫПИСКА из приказа С. И. К. от 22-Х-20 года**  
**П О С Т А Н О В Л Е Н И Е**  
1. Дондэк Наркомпроса и организации Сталинского Горного Техникума в Горный Институт принять и освоить.  
2. Принимая во внимание успешное развитие Сталинского Горного Техникума, постановку соответствующих курсов, образование Библиотечки, лабораторий и полигонных соответствующих карьерно-рабочей и профсоюзной, работу высшей школы в течение одной недели по указу С.И.К. СССР об образовании и оказавшей году для Сталинского Горного Техникума 2.000.000 руб.  
3. Считать необходимым роспись соответствующего указу, расходованию и дооборудованию Сталинского Горного Техникума переводить его в техникум 3 год в институт (Специально по указу).  
4. Перевести Институт разработать соответствующие учебные планы для Сталинского Горного Техникума с тем, чтобы на 1927 учебный год перейти на программы Горного Института, одновременно разработать учебные программы по специальности «Техника и профсоюз» для обеспечения промышленности и сельского хозяйства СССР иными техническими персоналом.  
Следовать С.И.К. СССР Гражданки



**Основатели кафедр и факультетов**  
В.И. Белов, Н.С. Шеренко, А.М. Порушилин, С.С. Гершков, П.Г. Рубин, В.В. Краев, А.В. Чернов, А.И. Пуляев



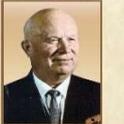
Статья ректора И.М. Пугача в газете «Углеметаллург»



В 1930 г. ДГИ занял I место среди технических вузов СССР за перестройку учебных планов, приближенных к производству. Выдана премия в 3 млн руб. на строительство 1-го учебного корпуса и студгородка

**Факультеты:**  
- горный;  
- углехимический (1928 г.)  
- вечерний металлургический техникум (1924 г.)  
- вечерний металлургический институт (1929 г.)

### Известные выпускники этого периода



**Н.С. Хрущев**  
выпускник горного факультета (1928 г.), Председатель Совета Министров СССР (1958-1964 гг.), первый Перов Социалистического Труда



**П.С. Кучеров**  
выпускник горного факультета (1928 г.), чл. корр. Академии наук УССР



**К.С. Борисенко**  
выпускник горного факультета (1928 г.), чл. корр. Академии наук УССР, ректор ДГИ (1943-1951 гг.)



**М.С. Архангельский**  
выпускник горного факультета (1928 г.), Герой Социалистического Труда



**В.Г. Гейер**  
выпускник углехимического факультета (1930 г.), д.т.н., проф., проректор по научной работе ДНУ, заслуженный деятель науки и техники УССР



**М.Г. Ельяшович**  
выпускник металлургического факультета (1931 г.), д.т.н., проф., основатель и первый заместитель обогатительной промышленности УССР

## СТУДЕНЧЕСКАЯ ЖИЗНЬ



Работа в сталовой мастерской



Лабораторно-испытательная работа



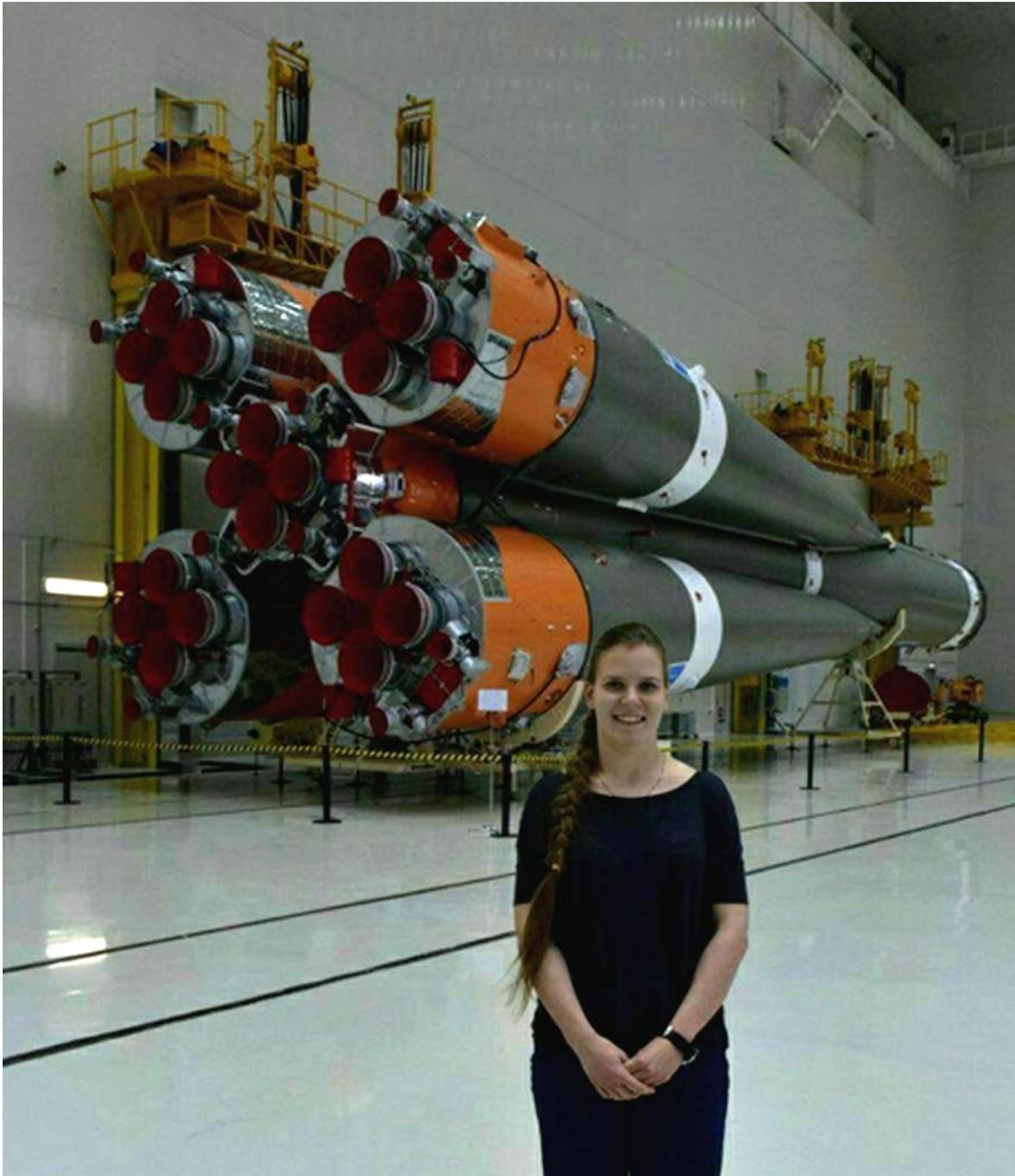
Учебно-студенческое общество



На лекции И.М. Пугача

## Поздравление ДонНТУ со 100-летием от выпускниц факультета КНТ Ольги и Татьяны Гранкиных

Выпускницы бакалавриата кафедры АСУ факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета **Ольга и Татьяна Гранкины** с отличием окончили магистратуру Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.



В настоящее время Татьяна разрабатывает бизнес-решения для автоматизации процессов юридического сопровождения, а Ольга – ведущий инженер-программист АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна. Ольга окончила аспирантуру и готовится к защите диссертационной работы.

Девушки прислали в адрес альма-матер теплые слова поздравлений со **100-летним юбилеем**:

*«Искренне приветствую и поздравляю преподавателей, студентов, сотрудников и выпускников Донецкого национального технического университета со 100-летием со дня его основания. Отдельно хочу поблагодарить преподавателей кафедры автоматизированных систем управления факультета компьютерных наук, которые дали мне путевку в жизнь.*

*За прошедшее время университетом было подготовлено большое число высококвалифицированных специалистов не только для Донбасса. Многие выпускники успешно реализовали себя в целом ряде стран ближнего зарубежья и не только. В ДонНТУ студенты получают и теоретические знания, и хорошую профессиональную подготовку, разносторонние практические навыки и умения.*

*За свою историю университет пережил немало сложных моментов, но не прекращал своей работы. Все это благодаря преданному коллективу сильных духом людей и высококлассных профессионалов своего дела. Уверена, что, сохраняя и приумножая накопленный потенциал, заложенный многими поколениями преподавателей и студентов, университет внесет еще больший вклад в развитие и конкурентоспособность нашего региона. Горжусь alma mater, слежу за ее успехами и сегодня!*

*Желаю руководству и всему преподавательскому составу ДонНТУ еще больших успехов в подготовке современных востребованных специалистов, а студентам – высоких достижений в учебе.*

*С уважением, Ольга Гранкина»*

*«От всей души хочу поздравить преподавательский состав, научных сотрудников, студентов, выпускников Донецкого национального технического университета со столетним юбилеем вуза!*

*В этом году для меня двойной праздник: у моей родной кафедры АСУ также 50-летний юбилей!*

*В свое время при выборе технического вуза не было ни доли сомнения в том, что ДонНТУ – один из лучших технических*

*университетов страны. После окончания обучения я ни разу не пожалела о своем выборе, а безмерно благодарна своим учителям, что дали сильную базу и опору для всей моей профессиональной жизни.*

*Сейчас я с уверенностью могу сказать, что тот уровень знаний, который получают выпускники вуза, достаточен. Наши специалисты обладают всеми необходимыми навыками инженера, способны влиться в любой технический коллектив, их работа всегда качественная и систематизированная. Учебная программа ДонНТУ постоянно корректируется и всегда актуальна. Студенты выходят готовыми специалистами без необходимости доучиваться, чтобы найти достойное место. Убеждена, что качество технического образования в ДонНТУ одно из лидирующих среди аналогичных технических вузов СНГ. Его выпускники обладают уверенностью в себе, своей востребованности, имеют желание работать по специальности.*

*Знания, полученные за годы обучения, я ежедневно применяю в своей профессиональной деятельности. В памяти очень свежи все лекции, голоса, лица преподавателей.*

*Я очень горжусь тем, что могу назвать себя выпускником Донецкого национального технического университета! Убеждена, что родной вуз в ближайшие годы станет еще более востребованным, будут развиваться научно-образовательные центры, международное сотрудничество!*

*Преподавательскому и научному составу хочется пожелать постоянного развития и научных успехов, а студентам и выпускникам – профессиональных побед.*

*С уважением, Татьяна Гранкина»*

## Поздравление ДонНТУ со 100-летием от выпускника факультета КНТ 1999 г. Привалова Максима



Уважаемый Александр  
Яковлевич!

Уважаемые преподаватели,  
студенты и выпускники ДонНТУ!

Примите самые искренние  
поздравления по поводу 100-  
летнего юбилея Донецкого  
национального технического  
университета.

100 лет – это достаточно  
продолжительный срок для того,  
чтобы оглянуться назад и оценить  
большой и славный пройденный  
путь от горного техникума до  
технического университета в  
настоящее время.

Становление ВУЗа происходило вместе с зарождающейся новой эпохой, вместе со становлением советской власти, когда молодой республике были инженерные кадры на развивающихся предприятиях угольного бассейна. Неразрывная связь с производством стала движущей силой для постоянного развития ВУЗа, появления новых востребованных специальностей. Это умение откликаться на веяние времени позволило ему стать одним из ведущих учебных заведений в своей стране и известным за рубежом.

Были открыты новые факультеты. Особенно интенсивно этот процесс шёл в 60е-70е годы. В 1971 году в составе энергетического факультета была создана кафедра АСУ, которая в нынешнем 2021 году будет отмечать 50-летний юбилей.

За эти годы университет дал знания тысячам своих выпускников, которые работают не только в своей стране, но и за рубежом. У каждого из выпускников свой путь, но где бы они ни трудились, их всегда характеризует высокий профессионализм, ответственность, заинтересованное отношение к своему делу.

За такую выучку мы все обязаны своим преподавателям. Они стали примером честного и ответственного отношения к своим обязанностям.

Каждый день они готовили интересные лекции, дарили знания. Поэтому и от студентов требовали такой же отдачи: работы над пройденным материалом, работы над собой, достойных и продуманных защит дипломных проектов. Таким образом происходило не только обучение, но и воспитание на собственном примере.

Я бесконечно благодарен всем преподавателям старшего поколения, которые меня учили. А когда сам преподавал в родном ВУЗе, старался так же честно и ответственно обучать студентов.

Хочу высказать самые тёплые слова благодарности за путёвку в жизнь, которую мне, как и тысячам других выпускников, выдали университет и родная кафедра.

Желаю коллективу ДонНТУ успехов в дальнейшем развитии и приумножении лучших традиций университета, а кафедре АСУ – продолжать занимать достойное место в подготовке молодых востребованных специалистов.

Дорогие коллеги, всем здоровья и благополучия, мира и добра!

Доцент кафедры «Информационные технологии» ФГБОУ ВО  
«ДГТУ», г. Ростов-на-Дону,  
выпускник ДонНТУ 1999 года, М. В. Привалов

# **Информатика и вычислительная техника**

УДК 004.75

## Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры

А. Я. Аноприенко, А. А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров  
Донецкий национальный технический университет

e-mail: [mr.koibash@gmail.com](mailto:mr.koibash@gmail.com)

### Аннотация

*С целью анализа и прогнозирования развития сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры в статье рассмотрены особенности эволюции датчиков инерциальных измерительных модулей умных носимых устройств: акселерометра, гироскопа и магнитометра. Был проведён анализ их характеристик на примере сенсоров фирмы Analog Devices, а также выявлены определённые закономерности их развития на протяжении последних лет и получены соответствующие аналитические зависимости. На основании результатов проведенного анализа определены перспективные направления для дальнейших исследований.*

### Введение

Современное развитие глобальной информационно-коммуникационной сети Интернет характеризуется стремительным ростом количества умных вещей, которые к нему подключены. Число таких устройств уже превышает количество живущих на Земле людей, и в этом контексте говорят об Интернете вещей – совокупности взаимодействующих друг с другом устройств.

Такая концепция сети умных вещей предполагает возможность обмена данными между её узлами и принятия различных решений на основе полученных данных. Весь этот процесс может осуществляться без прямого участия человека.

Поскольку окружающая среда является чрезвычайно сложной системой она характеризуется множеством различных параметров, которые могут иметь комплексное влияние, в условиях дефицита информации или больших погрешностей в процессе её получения и/или хранения может снижаться точность вычислений, что в целом ряде ситуаций существенно повышает вероятность возникновения критических ошибок [1].

Следовательно, актуальными являются вопросы интеграции множества разнородных датчиков в единую систему, поскольку это позволит охватить широкий спектр разнородной информации [2], и сбалансированного улучшения технических характеристик датчиков как отдельных устройств. В связи с этим возникает необходимость выявления закономерностей в развитии сенсорной системы на примере отдельных видов датчиков, что позволит определить динамику их дальнейшей эволюции.

### Датчики в умных носимых устройствах

Для анализа целесообразно рассмотреть такие устройства, которые оснащены большим количеством датчиков и при этом довольно часто используются в повседневной жизни. Примером таких устройств могут служить смартфоны, которые на сегодняшний день стали многофункциональными и массовыми устройствами. Если раньше их основными функциями была связь и запись аудио- и видеоданных, то сейчас они стали важными помощниками при различных повседневных делах: от составления расписаний, сёрфинга в интернете и онлайн-покупок до синхронизации устройства с телевизором, компьютером или системой умного дома. Для выполнения таких функций смартфон оснащён множеством различных компонентов, включая мощную сенсорную составляющую для сбора и анализа информации реального мира. Типичный современный смартфон является технологически сложным устройством с комплексной системой датчиков, обеспечивающей возможность определения местоположения, уровня освещённости и множества других параметров, связанных с окружающей средой.

Одним из важнейших особенностей как смартфона, так и других носимых умных устройств является возможность определения своего положения в пространстве [3]. Это достигается благодаря трём датчикам: акселерометру, гироскопу и магнитометру. Нередко все эти три сенсора объединены в единые инерциальные измерительные модули (IMU, Inertial Measurement Unit). Показания датчиков на смартфоне можно посмотреть при помощи различного программного обеспечения, например, приложения Sensors (рис. 1).

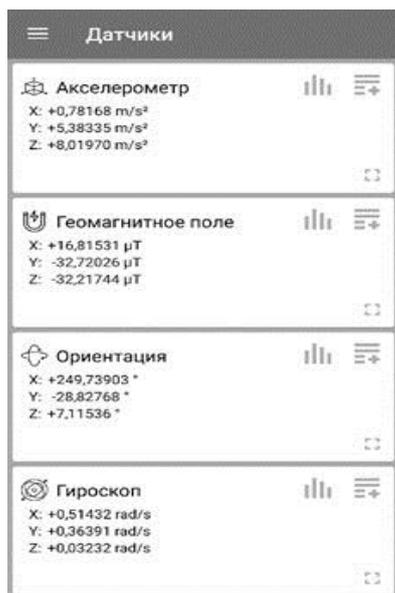


Рисунок 1 – Данные с датчиков смартфона, полученные при помощи приложения Sensors

Данные об изменении положения в пространстве используются как для удобства в эксплуатации гаджета (например, повороты экрана при наклоне), так и для получения

различной важной информации (например, функция подсчёта шагов).

Поэтому для первоначального анализа выбраны именно эти сенсоры.

### Акселерометр

Акселерометр предназначен для измерения ускорения. Будучи встроенным в гаджет, эту функцию он выполняет для всего устройства. Анализируя данные этого сенсора, приложения получают возможность определять, в каком направлении и с какой скоростью перемещается устройство. Благодаря этому датчику появилась возможность реагирования смартфона на различные жесты или встряхивания.

В мобильных устройствах, как правило, используются интегральные ёмкостные акселерометры. Измерительная часть такого электромеханического датчика состоит из пластин, одни из которых закреплены, а другие (инерционные) перемещаются по одной оси. Между пластинами образуется конденсатор, и при смещении изменяется ёмкость.

Принцип работы проиллюстрирован на рисунке 2.

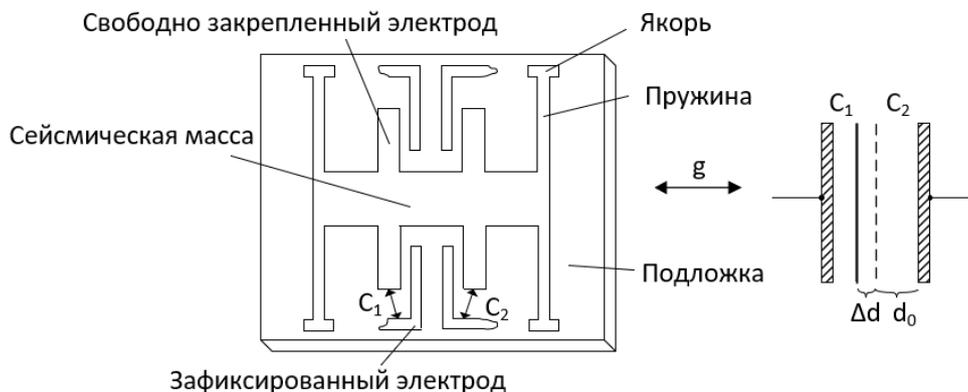


Рисунок 2 – Устройство емкостных акселерометров [4]

Поскольку датчик реализован на интегральной микросхеме, он имеет небольшие массу и размеры, однако достаточно точно и надёжно выполняет свою функцию. В связи с этим он получил широкое распространение.

Для рассмотрения выбраны акселерометры Analog Devices – одной из лидирующих американских компаний по производству интегральных микросхем. Производитель изготавливает семейство акселерометров ADXLxxx, первым из которых явился ADXL50, серийный выпуск которого был начат в 1991 году [5]. На сайте производителя представлена таблица с характеристиками выпускаемой продукции. К каждой модели прилагается документация. На выбор

предлагаются различные акселерометры с разными диапазонами измерений и чувствительностью. Выборочные данные, полученные в результате анализа документации и других источников [6-18], сведены в таблицу 1.

Дата выпуска устройства определяется по стартовой версии в истории доработок, приведенной в документах. Вес устройства, как правило, приводится в таблице сведений об упаковке. Отсутствуют точные сведения по весу для устройств выпуска начала 2000-х годов, так как в документации не указана данная информация (device weight: < 1.0 g) [9-10].

Это же касается и веса устройств ADXL377 и ADXL317.

Таблица 1 – Данные о некоторых устройствах семейства ADXLxxx

Модель	Дата, год	Вес устройства, г	Измеряемый диапазон, g	Ток питания, мкА
ADXL317	2019	–	16	5000
ADXL372	2017	0.18	200	22
ADXL355	2016	0.26	2, 4, 8	200
ADXL375	2013	0.03	200	145
ADXL350	2012	0.02	1, 2, 4, 8	166
ADXL377	2012	–	200	300
ADXL346	2010	0.018	16, 2, 4, 8	140
ADXL345	2009	0.03	16, 2, 4, 8	140
ADXL213	2004	< 1.0	1.2	700
ADXL311	2003	< 1.0	2	400
ADXL150	1996	5	50, 25	3 500
ADXL50	1991	5	50	10 000

В результате анализа можно сделать вывод, что за период с 1991 года по 2017 год наблюдается снижение веса устройства. По имеющимся данным найдена соответствующая зависимость. Информация сведена в график,

показанный на рисунке 3. Из графика видно, что весовые характеристики устройств уже с 2000-х годов не превышают 1 грамма и продолжают уменьшаться.

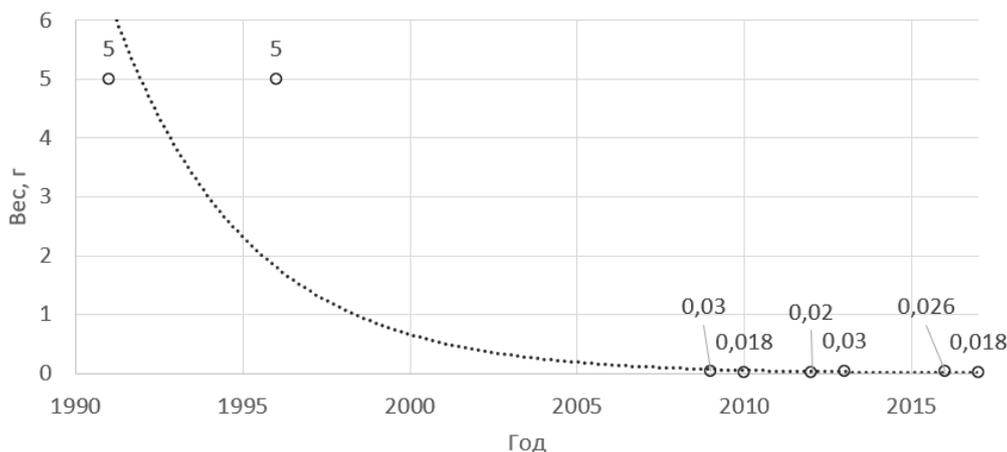


Рисунок 3 – График зависимости веса акселерометра от года выпуска (по данным работы [3])

Каждый акселерометр предназначен для конкретной области применения. В связи с этим наблюдаются различные диапазоны измерений, чувствительность, потребляемый ток. На сайте производителя размещено руководство по выбору наиболее подходящего акселерометра для конкретного устройства [19]. Например, устройства ADXL372, ADXL375 и ADXL377 отмечены как предназначенные для промышленности, мониторинга состояний конструкций или Интернета вещей, так как они характеризуются низким энергопотреблением и широким диапазоном измерений. На основании этих данных составлен график зависимости тока

питания от года выпуска устройства, показанный на рисунке 4. Таким образом, с течением времени выявлена тенденция к снижению тока питания в устройствах одного типа.

Для этих статистических данных найдены выражения зависимости значения  $y$  от года выпуска  $x$ . В формуле (1) значением  $y$  выступает вес акселерометра (рис. 3), а в формуле (2) — ток питания (рис. 4).

$$y = 8,1481e^{-0,251x+499,49}, \quad (1)$$

$$y = 452,3e^{-0,508x+1021,588}. \quad (2)$$

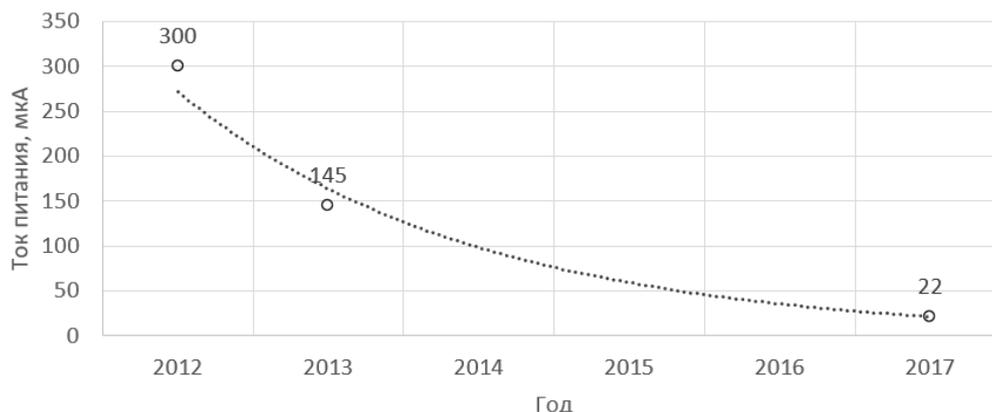


Рисунок 4 – График зависимости тока питания акселерометра от года выпуска (по данным работы [3])

### Гироскопы

Гироскоп реагирует на изменение углов ориентации тела. В умных носимых устройствах он реализован на интегральной микросхеме, поэтому, как и акселерометр, обладает лёгкостью, компактностью и высокой надёжностью. Благодаря такому датчику программное обеспечение получает информацию об поворотах и угловой скорости, которая в мобильных и носимых устройствах является важным фактором.

Микроэлектромеханический гироскоп измеряет угловую скорость при помощи ускорения Кориолиса. Для этого конструкция, содержащая инерционную массу, прикреплена к подложке пружинами под углом  $90^\circ$  относительно инерционного движения, как показано на рисунке 5. Как и в акселерометре, смещение определяется при помощи двух типов пластин (закреплённых и инерционных), образующих конденсатор – при движении его ёмкость изменяется.

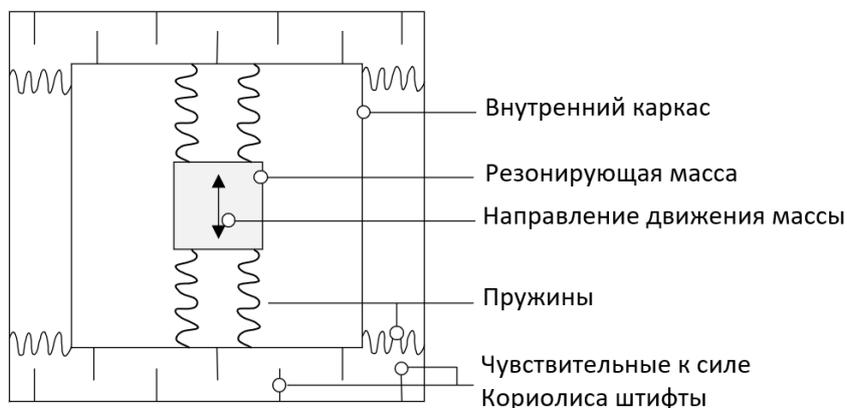


Рисунок 5 – Схема механической структуры гироскопа (перевод) [20]

Для анализа характеристик микроэлектромеханических гироскопов были также выбраны датчики фирмы Analog Devices. Первые сенсоры семейства ADXRS были выпущены компанией ещё в 2003 году [21], поэтому данная линейка и была выбрана для рассмотрения. Выборочные данные, полученные на основании анализа документации производителя гироскопов [22-32], сведены в таблицу 2. Как и при анализе документации акселерометров, дата выпуска гироскопа определена по стартовой версии в истории

доработок. Размерные характеристики устройства (длина, ширина, высота) пересчитаны в объём. В таблице также приведен измеряемый диапазон, так как он может напрямую определять некоторые характеристики исходя из назначения датчиков, а также указаны шумовые характеристики гироскопов.

На основе этих данных обнаружено, что с 2003 год по 2014 год наблюдается экспоненциальное (но специфическое) снижение размеров гироскопов, как показано на рисунке 6.

Таблица 2 – Данные о некоторых устройствах семейства ADXLxxx

Модель	Дата, год	Размер устройства, мм <sup>3</sup>	Измеряемый диапазон, °/s	Шумовые характеристики, °/sec/√Hz
ADXRS645	2014	216	2000	0.25
ADXRS290	2014	31	100	0.004
ADXRS810	2012	-	409.6	0.015
ADXRS453	2011	-	400	0.015
ADXRS620	2010	147	300	0.05
ADXRS622	2009	147	250	0.06
ADXRS610	2007	147	300	0.05
ADXRS614	2007	147	50	0.04
ADXRS401	2004	147	75	3 mV (rms)
ADXRS300	2003	147	300	0.1
ADXRS150	2003	147	150	0.05

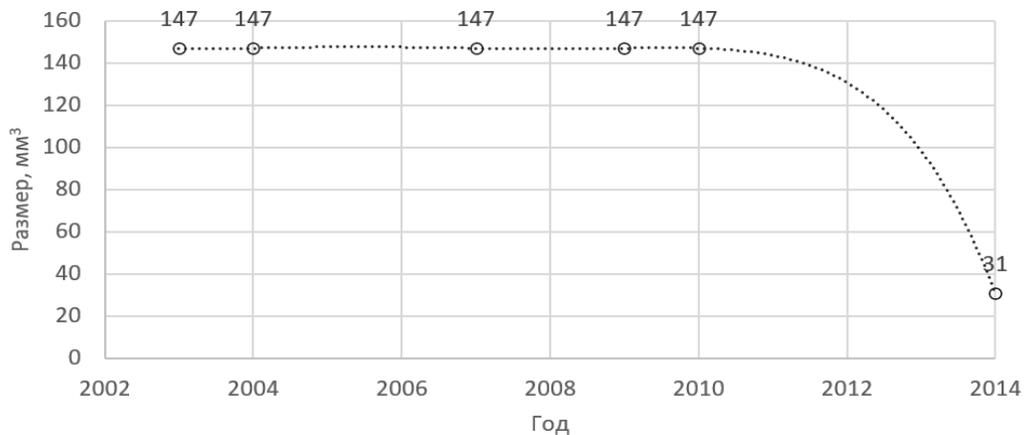


Рисунок 6 – График зависимости размера гироскопа от года выпуска (по данным работы [3])

Из таблицы также видно, что за указанный период улучшилась шумовая характеристика гироскопов. Данные по этой характеристике представлены в виде графика на рисунке 7. Устройство ADXRS645 не учитывалось при анализе, так как его измеряемый диапазон

намного выше аналогичного параметра у других датчиков, что указывает на его специализированную сферу применения. Соответственно, его шумовые характеристики пропорционально ниже, чем у других устройств.

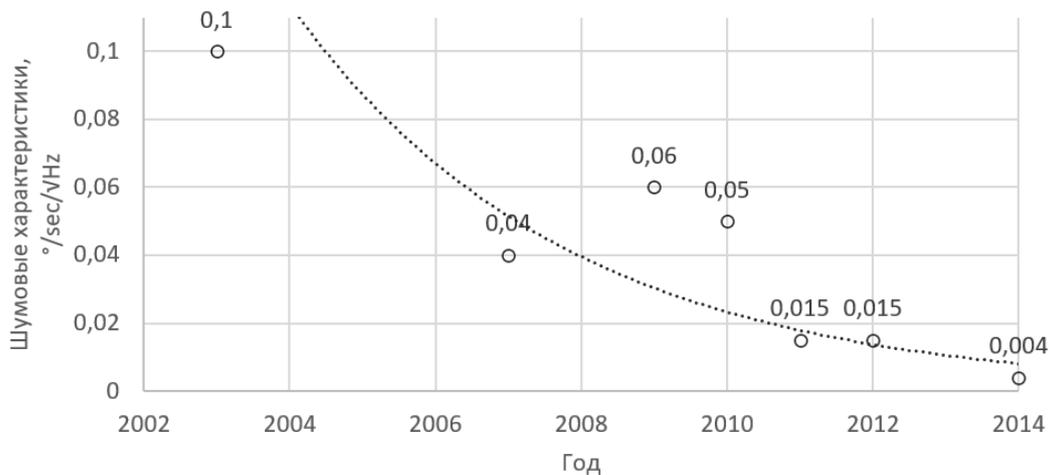


Рисунок 7 – График зависимости шумовых характеристик гироскопов от года выпуска (по данным работы [3])

Формула (3) показывает зависимость шумовых характеристик от года выпуска (рис. 7).

$$y = 0,193e^{-0,264x+528,528}. \quad (3)$$

Выражение для размеров гироскопов (рис. 6) не найдено, так как длительное время значение этого параметра держалось на одной и той же отметке. Впервые снижение обнаружено к 2014-му году (две последние модели), поэтому из-за нехватки статистических данных поиск каких-либо закономерностей по данной характеристике на данном этапе не является целесообразным.

### **Магнитометр**

Магнитометр используется для определения сторон света. Он представляет собой микроэлектромеханический сенсор для обнаружения и измерения магнитного поля. Реагируя на магнитные поля Земли, он позволяет достаточно точно узнать направление устройства. Таким образом, он является своего рода компасом в умных носимых устройствах.

Здесь магнитометр, также как и акселерометр с гироскопом, реализован на интегральных микросхемах, сохраняя все преимущества данного принципа разработки сенсоров. Множество таких электронных компасов функционируют благодаря силе Лоренца.

Для рассмотрения были выбраны магнитометры также фирмы Analog Devices. Однако на сайте производителя представлены только три связанных с магнитными полями датчика: магниторезистивные ADA4571 и ADA4571-2 от 2014 и 2016 годов соответственно и AD22151G на основе эффекта Холла. Поэтому на данный момент нельзя выявить какие-либо закономерности, так как отсутствует необходимый для этого объем данных.

### **Выводы**

Датчики являются структурной частью сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры, поэтому важно найти и отследить изменения в каждом устройстве для получения возможности прогнозирования будущего всей глобальной системы сенсоров. С этой целью в статье были рассмотрены микроэлектромеханические датчики фирмы Analog Devices, позволяющие определять положение устройства в пространстве: акселерометр, гироскоп и магнитометр.

Акселерометр позволяет измерять ускорение устройства. В ходе его анализа были выявлены тенденции к снижению веса датчика и уменьшению необходимого тока питания. По

данным зависимостям выведены аналитические зависимости.

Гироскоп предназначен для измерения поворотов и угловой скорости. Были выявлены тенденции к улучшению шумовых характеристик, и определена формула для данной зависимости. Также обнаружено уменьшение размеров гироскопа в последних моделях, однако на данный момент недостаточно данных для выведения каких-либо формул.

Назначение магнитометров состоит в обнаружении и измерении магнитного поля. На сегодняшний день искать закономерности в развитии микроэлектромеханических магнитометров не является целесообразным, поскольку эти датчики относительно новые и на данном этапе не хватает нужного объема данных для какого-либо статистического анализа.

Полученные зависимости наглядно показывают экспоненциальный характер закономерностей, что позволит определять перспективы развития этих датчиков и в будущем. Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на сбор статистических данных и поиск закономерностей в развитии других типов сенсоров.

### **Литература**

1. Койбаш, А. А. Пути повышения эффективности устройств сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры / А. А. Койбаш // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 2(16). – С. 51-57.
2. Аноприенко, А. Я. Разработка прототипа суперсенсорного компьютера: особенности реализации и визуализации результатов измерений / А. Я. Аноприенко, Р. Л. Варзар // Материалы пятой международной научнотехнической конференции «Моделирование и компьютерная графика», 24-27 сентября 2013 г., Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 218-229.
3. Койбаш, А. А. Закономерности развития сенсорной составляющей мобильных компьютерных систем / А. Койбаш, Н. С. Максименко, К. А. Сидоров // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2020): сборник трудов XVIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 3-5 декабря 2020 г.): в 3 т. / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – Т. 1. – 284 с.
4. Venkatanarayanan, A. Review of Recent Developments in Sensing Materials / A. Venkatanarayanan, E. Spain // Comprehensive Materials Processing. – Dublin, 2014. – PP. 47-101.

5. Волович, А. Интегральные акселерометры [Электронный ресурс] / А. Волович, Г. Волович // Компоненты и технологии. – №1 1'2002. – Режим доступа: [https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2002\\_01\\_66.pdf](https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2002_01_66.pdf) (дата обращения: 24.08.2020)

6. ADXL50: Monolithic Accelerometer With Signal Conditioning Obsolete Data Sheet. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/2044696ADXL50.pdf> (accessed 24 August 2020).

7. ADXL150\_250: 65 g to 650 g, Low Noise, Low Power, Single/Dual Axis iMEMS Accelerometers Obsolete Data Sheet. Available at: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/adxl150\\_250.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/adxl150_250.pdf) (accessed 24 August 2020).

8. Баринов, И. Н. Микромеханика вокруг нас [Электронный ресурс] / И. Н. Баринов, В. С. Волков. – Режим доступа: [https://dep\\_pribor.pnzgu.ru/files/dep\\_pribor.pnzgu.ru/mikromehanika\\_vokrug\\_nas.pdf](https://dep_pribor.pnzgu.ru/files/dep_pribor.pnzgu.ru/mikromehanika_vokrug_nas.pdf) (дата обращения: 24.08.2020).

9. ADXL311: Ultracompact  $\pm 2g$  Dual-Axis Accelerometer Obsolete Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADXL311.pdf> (accessed 24 August 2020).

10. ADXL213: Low Cost  $\pm 1.2 g$  Dual Axis Accelerometer Data Sheet (Rev. A). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL213.pdf> (accessed 24 August 2020).

11. ADXL345: 3-Axis,  $\pm 2 g/\pm 4 g/\pm 8 g/\pm 16 g$  Digital Accelerometer Data Sheet (Rev. E). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf> (accessed 24 August 2020).

12. ADXL150\_250: 65 g to 650 g, Low Noise, Low Power, Single/Dual Axis iMEMS Accelerometers Obsolete Data Sheet. Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL346.pdf> (accessed 24 August 2020).

13. ADXL346: 3-Axis,  $\pm 2 g/\pm 4 g/\pm 8 g/\pm 16 g$  Ultralow Power Digital Accelerometer Data Sheet (Rev. C). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL377.pdf> (accessed 24 August 2020).

14. ADXL350: 3-Axis,  $\pm 1g/\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$  Digital Accelerometer Data Sheet (Rev. 0). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL350.pdf> (accessed 24 August 2020).

15. ADXL375: 3-Axis,  $\pm 200 g$  Digital MEMS Accelerometer Data Sheet (Rev. B). Available at: [https://www.analog.com/media/en/technical-](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL375.PDF)

[documentation/data-sheets/ADXL375.PDF](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL375.PDF) (accessed 24 August 2020).

16. ADXL354/ADXL355: Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers Data Sheet (Rev. B). Available at: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl354\\_355.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl354_355.pdf) (accessed 24 August 2020).

17. ADXL372: Micropower, 3-Axis,  $\pm 200 g$  Digital Output, MEMS Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL372.pdf> (accessed 27 August 2020).

18. ADXL317: 3-Axis,  $\pm 16 g$ , I2 S Digital Accelerometer Data Sheet (Rev. 0). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL317.pdf> (accessed 27 August 2020).

19. Murphy, C. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application – Part 1 / C. Murphy // Analog Dialogue 51-10. – 2017. – Available at: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-51/number-4/articles/choosing-the-most-suitable-mems-accelerometer-for-your-application-part-1.pdf> (accessed 28 August 2020).

20. Watson, J. Mems Gyroscope Provides Precision Inertial Sensing in Harsh, High Temperature Environments / J. Watson. – Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/MEMS-Gyroscope-Provides-Precision-Inertial-Sensing-in-Harsh-High-Temps.pdf> (accessed 3 October 2020).

21. Власенко, А. Микромеханические датчики Analog Devices iMEMS: эволюция продолжается [Электронный ресурс] / А. Власенко // Компоненты и технологии. – № 6'2005. – Режим доступа: <https://kit-e.ru/sensor/mikromehaniicheskie-datchiki-analog-devices-imems-evolyucziya-prodolzhaetsya/> (дата обращения: 03.10.2020)

22. ADXRS150:  $\pm 150^\circ/s$  Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning Obsolete Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADXRS150.pdf> (accessed 07 October 2020).

23. ADXRS300:  $\pm 300^\circ/s$  Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS300.pdf> (accessed 07 October 2020).

24. ADXRS401:  $\pm 75^\circ/s$  Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning Data Sheet (Rev. 0). Available at: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXR](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS401.pdf)

25. ADXRS614:  $\pm 50^\circ/\text{s}$  Yaw Rate Gyro Data Sheet (Rev. A). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS614.pdf> (accessed 07 October 2020).

26. ADXRS610:  $\pm 300^\circ/\text{sec}$  Yaw Rate Gyro Data Sheet (Rev. A). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS610.pdf> (accessed 07 October 2020).

27. ADXRS622:  $\pm 250^\circ/\text{sec}$  Yaw Rate Gyroscope Data Sheet (Rev. C). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS622.pdf> (accessed 07 October 2020).

28. ADXRS620:  $\pm 300^\circ/\text{sec}$  Yaw Rate Gyro Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS620.pdf> (accessed 07 October 2020).

29. ADXRS453: High Performance, Digital

Output Gyroscope Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS453.pdf> (accessed 07 October 2020).

30. ADXRS810: High Performance, SPI Digital Output, Angular Rate Sensor Data Sheet (Rev. 0). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS810.pdf> (accessed 07 October 2020).

31. ADXRS290: Ultralow Noise, Dual-Axis Gyroscope Data Sheet (Rev. A). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS290.pdf> (accessed 11 October 2020).

32. ADXRS645: High Temperature, Vibration Rejecting  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$  Gyroscope Data Sheet (Rev. B). Available at: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS645.pdf> (accessed 11 October 2020).

*Анопrienko А. Я., Койбаш А. А., Максименко Н. С., Сидоров К. А. Закономерности развития инерциальных датчиков информационно-компьютерной инфраструктуры. С целью прогнозирования направления дальнейшего развития сенсорной составляющей информационно-компьютерной инфраструктуры в статье были рассмотрены особенности эволюции датчиков инерциальных измерительных модулей умных носимых устройств: акселерометра, гироскопа и магнитометра. Был проведён анализ их характеристик на примере сенсоров фирмы Analog Devices, а также выявлены определённые закономерности их развития на протяжении последних лет и получены выражения зависимостей в виде формул. На основании результатов данного анализа определены перспективные направления для дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** закономерности, сенсорная составляющая, сенсоры, акселерометр, гироскоп, магнитометр, МЭМС.

*Anoprienko A., Koibash A., Maksimenko N., Sidorov K. Regularities in the development of inertial sensors of information and computer infrastructure. In order to predict the further development direction of the sensor component of the information and computer infrastructure, the article considered the features of the sensors of inertial measuring modules of smart wearable devices: accelerometer, gyroscope and magnetometer. An analysis of their characteristics was carried out using the example of Analog Devices sensors, and certain patterns of their development over the past years were revealed and expressions of the dependencies were obtained in the form of formulas. Based on the results of this analysis, promising directions for further research have been identified.*

**Keywords:** patterns, sensory component, sensors, accelerometer, gyroscope, magnetometer, MEMS.

Статья поступила в редакцию 30.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.

УДК 004.9

## Опыт участия в международных соревнованиях по анализу данных как способ стимулирования исследовательских навыков обучающихся

И. В. Багаев<sup>1</sup>, И. С. Канищев<sup>2</sup>, В. П. Охупкин<sup>3</sup>, А. В. Шатров<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Gram Games Limited, W6 0LE, United Kingdom,

<sup>2</sup>Вятский государственный университет, г. Киров, Россия,

<sup>3</sup> Центр экспертно-аналитических и информационных технологий СП РФ, г. Москва, Россия,

<sup>4</sup> Кировский государственный медицинский университет, г. Киров, Россия

e-mail: [iv-bagaew@yandex.ru](mailto:iv-bagaew@yandex.ru), [kanishchev.ilya@gmail.com](mailto:kanishchev.ilya@gmail.com),  
[vpokhapkin@yandex.ru](mailto:vpokhapkin@yandex.ru), [avshatrov1@yandex.ru](mailto:avshatrov1@yandex.ru)

### Аннотация

*Анализ данных востребован для различных областей науки и большого числа прикладных исследований в промышленности, образовании и экономике. В данной работе рассматривается опыт обучения магистров по специальности «Прикладная информатика», магистерская программа «Анализ данных». Особое внимание уделяется тому, как привлечь обучающихся к активному участию в научных исследованиях. Такую возможность предоставляет система международных соревнований по анализу данных среди студенческих команд Data Mining Cup, а также платформа Kaggle.*

### Введение

Анализ данных (*data mining*) (DM) или вычислительная статистика является сравнительно новой научной областью. Важность DM обусловлена огромными базами данных, которые порождаются передовыми технологиями. В настоящее время, вычислительная статистика является одним из наиболее динамичных и перспективных научных направлений. Успешные результаты в области DM базируются на глубоком понимании статистических закономерностей и на свободном владении языками научного программирования.

В отличие от теоретической статистики, вычислительная статистика ориентирована на обработку и анализ реальных данных. Соответственно, центральным вопросом является выбор оценивающего критерия, согласно которому производится сравнение различных методов и алгоритмов. Исследования и эксперименты базируются на данных, которые использовались при проведении международных соревнований по анализу данных на платформе Kaggle<sup>1</sup>. В этом смысле соревнования по DM представляются очень перспективным направлением. С одной стороны, эти соревнования предусматривают участие в отдельном проекте десятков и сотен независимых команд. С другой стороны, оценка качества результатов является совершенно независимой.

Идея проведения соревнований по анализу данных была впервые предложена и реализована организаторами международной конференции KDD (Knowledge Discovery in Databases) в 1998 году. По ряду причин эта идея является очень перспективной с точки зрения подготовки кадров и преподавания в области DM и машинного обучения.

В настоящее время платформа Kaggle размещена и поддерживается на ресурсной базе Стэнфордского университета. Кроме этого проводятся ежегодные международные соревнования по анализу данных среди студенческих команд Data Mining Cup<sup>2</sup> (DMC). На протяжении 20 лет DMC успешно преодолевает разрыв между теорией и практикой в анализе данных. Каждый год весной PrudSys AG, компания, специализирующаяся на персонализации в реальном времени, призывает студентов со всего мира соревноваться в анализе данных и машинном обучении. В 2018 году конкурс DMC установил очередной рекорд по количеству участников: в нем приняли участие 190 команд из 153 университетов из 48 стран мира. Следует отметить, что в традициях российского математического образования, а также в преподавании информатики накоплен большой опыт организации дистанционных соревнований и конкурсов [1]. Нельзя не упомянуть в данном контексте международные соревнования по спортивному программированию.

<sup>1</sup> [www.kaggle.com](http://www.kaggle.com)

<sup>2</sup> <https://www.data-mining-cup.com>

Спортивное программирование – индивидуальные или командные соревнования, цель которых состоит в алгоритмизации и программировании решения весьма сложных логических задач на время. International Collegiate Programming Contest (ICPC) – самое авторитетное соревнование по спортивному программированию. Проходит ежегодно под эгидой Association for Computing Machinery (ACM), ассоциации, объединяющей IT-профессионалов по всему миру. С 1997 года финалы ICPC организует IBM.

### **Постановка задачи**

Для полноценной организации учебной работы и подготовки кадров в области анализа данных была составлена в 2011 г. учебная программа «Анализ данных» подготовки магистров по направлению 09.04.03 «Прикладная информатика» на кафедре математического моделирования Вятского государственного университета. В базовой части учебного плана включены следующие дисциплины по профилю: «Математические методы и модели анализа данных», «Программные средства и ресурсы анализа данных», «Нейросетевые технологии и распознавание образов», «Современные методы многомерной статистики», «Продвинутый курс эконометрического моделирования», «Методы и модели прогнозирования», «Математические методы и модели машинного обучения». В разделе «по выбору» учебного плана включены дисциплины: «Индивидуально-ориентированное программирование», «Объектно-ориентированное программирование», «Методы и технологии параллельных вычислений», «Программные средства и методы имитационного моделирования», «Моделирование финансовых потоков в банковской деятельности», «Современные методы экономико-математического моделирования». Учебным планом предусмотрены научные семинары и факультативные занятия, на которых магистранты получают опыт участия в научных проектах, соревнованиях по анализу данных, проводят обзоры публикаций по темам учебного плана и выбранным темам выпускных квалификационных работ. Именно на семинарских занятиях магистранты знакомятся с технологиями работы платформы Kaggle, в частности с её разделом Kaggle In Class<sup>3</sup>, ориентированным на работу со студентами.

### **Разработка методик**

<sup>3</sup> <https://inclass.kaggle.com>

Data Mining переводится с английского как «добыча данных». Нередко рядом с термином Data Mining встречаются слова «обнаружение знаний в базах данных» (knowledge discovery in databases) и «интеллектуальный анализ данных». Их можно считать синонимами Data Mining. Возникновение всех указанных терминов связано с новым витком в развитии средств и методов обработки данных. Следует отметить, что однозначного определения того, что в западной научной литературе называется Data Mining (DM) и переводится на русский как «Анализ данных», нет. А. Дьяконов считает, что этот перевод не точно отражает специфику DM. «Термин не совсем удачный, поскольку слово «анализ» в математике достаточно привычно, имеет устоявшееся значение и входит в название многих классических разделов: математический анализ, функциональный анализ, выпуклый анализ, нестандартный анализ, многомерный комплексный анализ, дискретный анализ, стохастический анализ, и т.д.»<sup>4</sup> Анализ данных востребован для различных областей науки и большого числа прикладных исследований в промышленности (биоинформатика, биофармацевтика, медицина, и др.), экономики (финансовый трейдинг, маркетинг, торговля). Природа данных при анализе не имеет большого значения, важно, чтобы предоставленные данные имели соответствующую структуру и объем.

Некоторые исследователи определяют, исходя из технологии решаемых задач, DM как «Машинное обучение» (Machine Learning) или, ещё более конкретно «Статистическое обучение» (Statistical Learning) [2], учитывая, что в основе большинства задач лежат методы статистической обработки данных. Несмотря на то, что математическая статистика представляет собой хорошо разработанную область математики, многие задачи DM «индивидуальны», и сейчас появляются всё новые и новые классы задач, под которые необходимо разрабатывать математический аппарат. При этом большую роль играет тот факт, что DM относительно новое направление в науке. Поскольку является важным тот факт, что в анализе данных мы используем в качестве инструментальной базы компьютеры, специальное программное обеспечение и специализированные пакеты, то естественно отнести DM к информационным технологиям (ИТ). Суммируя вышесказанное, можно заключить, что Data Mining –

<sup>4</sup> <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/7/7e/Dj2010up.pdf>

мультидисциплинарная область, возникшая и развивающаяся на базе таких наук, как: прикладная статистика, машинное обучение, распознавание образов, искусственный интеллект, теория баз данных. Тем более было бы интересно структурировать «изнутри» эту новую область компьютерной науки. Не претендуя на общность, рассмотрим следующую структуру DM, опираясь на свой опыт и, в частности, на учебный план нашего курса «Анализ данных». Эта структура следует, в первую очередь, из решаемых задач как учебных в преподавании курса, так и исследовательских, из которых в конечном итоге формируются выпускные квалификационные работы.

Итак, мы выделяем три основных направления в предметной области DM.

**Первое направление** - это работа с данными, выявление закономерностей (свободный поиск – Discovery) в имеющихся обучающих выборках, классификация данных, методы регрессионного анализа, включая линейную и нелинейную регрессии, логистическую регрессию, дискриминантный анализ, методы, основанные на деревьях решений. Основной задачей этого раздела является выявление и проверка закономерностей, полученных на обучающих выборках, последующий контроль на тестирующих выборках и прогнозирование на основе полученных закономерностях.

**Второе важное направление** – это рекомендательные системы (Rec Sys). Рекомендательные системы – это область машинного обучения, целью которой является создание алгоритмов для определения пользовательских предпочтений на базе известных оценок или поведения пользователя в прошлом при выборе или принятии решения. Применение таких систем в спорте, маркетинге и образовании имеет большое значение. В частности, определённый интерес применения таких систем в образовании состоит в улучшении методов оценивания студентов, состоящий в прогнозе ответит ли студент правильно на следующий вопрос, если известен результат предыдущего испытания. Такие прогнозы могут помочь студенту правильно сориентироваться и определить ту область знаний, на которую следует обратить особое внимание.

**Третье направление** в нашей классификации представляет обширная область работы с данными различной природы – распознавание образов (Pattern Recognition). В данной области основным инструментом

являются нейросетевые технологии обработки данных.

Классической задачей распознавания образов является распознавание текстов. Основной задачей распознавания текстовых образов является перевод рукописного текста в электронную форму. Большое число разнообразных задач распознавания изображений с использованием нейронных сетей приводит к необходимости совершенствования нейросетевых технологий. С точки зрения машинного обучения, нейронная сеть представляет собой обобщение линейной регрессии. В основе работы с нейронными сетями лежит принцип обучения нейронной сети на части выборки, так называемой обучающей выборке.

Наиболее простым и популярным способом обучения нейронной сети является метод обучения с учителем (на маркированных данных) — метод обратного распространения ошибки [3] и его модификации. Суть метода состоит в том, что во время обратного прохождение сигнала по всем слоям сети все синаптические веса настраиваются в соответствии с правилом коррекции ошибок, а именно: фактический выход сети вычитается из желаемого, в результате чего формируется сигнал ошибки. Этот сигнал впоследствии распространяется по сети в направлении, обратном направлению синаптических связей.

При решении практических исследовательских задач, разумеется, нет никакого деления на описанные выше направления и составляющие области DM, сама идея структурирования преследует цель рассмотреть в небольшом объеме статьи примеры решения нескольких исследовательских задач, взятых из базы данных международных соревнований на платформе Kaggle.

Работа с данными на этапе выявления закономерности подразумевает несколько этапов действий:

1) Свободный поиск выполняет следующие действия: выявление закономерностей условной логики; выявление закономерностей ассоциативной логики; выявление трендов и колебаний. На стадии свободного поиска также должна осуществляться валидация закономерностей, т.е. проверка их достоверности на части данных, которые не принимали участие в формировании закономерностей. Такой прием деления данных на обучающее и проверочное множество часто используется в методах нейронных сетей и деревьев решений.

2) Использование выявленных закономерностей для предсказания неизвестных значений (прогностическое моделирование). Вторая стадия DM использует результаты работы первой стадии. Здесь обнаруженные закономерности используются непосредственно для прогнозирования. В процессе прогностического моделирования решаются задачи классификации и прогнозирования. При решении задачи классификации результаты работы первой стадии (индукции правил) используются для отнесения нового объекта, с определенной уверенностью, к одному из известных, predetermined классов на основании известных значений. При решении задачи прогнозирования результаты первой стадии (определение тренда или колебаний) используются для предсказания неизвестных (пропущенных или же будущих) значений целевой переменной (переменных). Следует отметить, что свободный поиск раскрывает общие закономерности. Анализ исключений (Forensic Analysis) На этой стадии Data Mining анализируются исключения или аномалии, выявленные в найденных закономерностях. Действие, выполняемое на этой стадии, – выявление отклонений (deviation detection). Для выявления отклонений необходимо определить норму, которая рассчитывается на стадии свободного поиска. Данное обстоятельство играет очень важную роль в тех задачах, где существуют данные, по тем или иным причинам не учитываемые в процессе обучения или их роль не может быть выявлена на этапе выявления закономерности.

### **Эксперименты с данными Credit**

Данные «Credit» использовались при проведении соревнования «Give me some credit» на платформе Kaggle. В рамках этого соревнования было необходимо определить кредитоспособность клиента в ближайшие 90 дней. Цель соревнования состояла в том, чтобы построить на основании исторических данных наиболее эффективный классификатор кредитоспособности клиентов. Соревнование привлекло около тысячи участников-команд со всего мира. Объясняющие переменные включают всю информацию о клиентах: возраст, состав семьи, доход, кредитная история и т.д. Объясняемая (целевая) переменная является бинарной и принимает два значения – 0 для «хороших» клиентов и 1 для «плохих», имеющих определенный срок задолженности. Особенностью данной задачи является её несбалансированность: проблемные клиенты составляют ~6,5% от общей выборки. Результаты подведения итогов представленных

решений подводятся ежедневно, также ежедневно публикуется рейтинг участников с указанием качества решений, информации об участниках, комментарии на форуме соревнования. Анонимизированные данные соответствуют 250000 клиентам, из которых 100000 с неизвестными метками были отведены для тестирования и подведения итогов соревнования. Данные предоставляются в виде списков по клиентам и имеют следующую структуру, см. Табл. 1. Следует отметить, что из данной таблицы в дальнейшем используются пронумерованные данные объясняющих переменных  $v_1-v_{10}$ .

Все данные (250000 наблюдений) разделены на 2 части: 150000 тысяч для тренировки и 100000 для тестирования. В данном случае первый набор разбит десять раз случайным образом на три части (триплет):

- Тренировочный набор – значения целевой переменной известны. Необходим для обучения модели.
- Валидационный набор – значения целевой переменной также известны. Необходим для предварительной проверки качества модели.
- Тестирующий набор – значения целевой переменной необходимо предсказать, используя полученную ранее модель.

Для решения задач DM в настоящее время применяется множество разнообразных методов и алгоритмов. Важным фактором является их эффективная компьютерная реализация. Существует множество различных пакетов прикладных программ, предназначенных для этого: R, Matlab, Python и JAVA/Weka и другие. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, что порождает проблему выбора. В данной работе для всех вычислений используется среда разработки R [2]. Этот программный продукт является свободно распространяемым ПО. Стандартный набор методов решения по оценке риска кредитования представляет следующие подходы: линейная и логистическая регрессии; алгоритм решающих деревьев; бустинг над решающими деревьями; нейронные сети. В ходе экспериментов в качестве обучающей и валидационной выборки используются наборы данных с 50000 наблюдений в каждом: *train* – обучающая выборка, предназначенная для тренировки классификатора; *valid* – валидационная выборка, необходимая для оценки эффективности и контроля переобучения. Важно, чтобы при таком разбиении подвыборки сохраняли свою репрезентативность относительно генеральной совокупности.

Поэтому для сохранения исходной структуры при формировании наборов данных было использовано непрерывное равномерное распределение случайных величин. Для всех переменных в дальнейшем будут использоваться сокращения, приведённые в Табл. 1.

Таблица 1. Структура данных «Credit»

Имя переменной	Описание	Тип
<i>SD2</i> (целевая переменная)	Имеет ли клиент 90 или более дней долга	Да/Нет
$(v_1)$	Общий остаток по кредитным картам делённый на сумму кредитов	percentage
$(v_2)$	Возраст клиента в годах	integer
$(v_3)$	Количество фактов долга в 30-59 дней за последние 2 года	integer
$(v_4)$	Месячные выплаты долгов, делённые на месячный валовой доход	percentage
$(v_5)$	Месячный доход	integer
$(v_6)$	Число открытых кредитов	integer
$(v_7)$	Количество фактов долга по выплате на 90 дней и более	integer
$(v_8)$	Количество ипотечных кредитов	integer
$(v_9)$	Количество фактов долга в 60-89 дней за последние 2 года	integer
$(v_{10})$	Количество иждивенцев в семье	integer

В качестве среды разработки выбрана IDE RStudio 0.98.1103<sup>5</sup>, версия языка R 4.0.3. Дополнительные пакеты R, используемые в ходе экспериментов:

“*ggplot2*” – построение графиков, диаграмм  
“*pROC*” – оценка качества классификации;  
“*rpart*” – решающие деревья;

“*gbm*”, “*xgboost*” – бустинг над решающими деревьями;  
“*nnet*” – нейронные сети;  
“*caret*” – комплексная оптимизация регулирующих параметров алгоритмов.

Одним из самых распространённых способов оценки качества бинарной классификации является нахождение площади под ROC-кривой. ROC-кривая (Receiver Operator Characteristic) – график, позволяющий оценить качество классификации в задаче с двумя классами. Она отображает зависимость между долей правильно классифицированных и долей ошибочно классифицированных объектов [4]. Численной характеристикой данного метода является AUC (Area Under Curve) – площадь под ROC-кривой. Её значения лежат в интервале [0,1]. Именно этот показатель чаще всего используется для сравнительного анализа нескольких классификаторов. Чем больше значение AUC, тем лучше качество классификации; при значении 0.5 («случайное угадывание») модель можно расценивать как плохую. Графики этой величины позволяют визуально оценивать эффективность выбранных методов. Кроме того, R позволяет вывести информацию о построенной модели с помощью команды *summary(model)*. В результате получаем коэффициенты (*estimate*) для всех переменных и свободный член (*intercept*), значения ошибок или стандартного отклонения для каждого из них, t-критерий Стьюдента и т.д. Работа в составе группы позволяет провести множество вычислительных экспериментов по сравнению разных методов и, что более важно, выбрать из множества вариантов при оптимизации алгоритмов при относительно большом числе настроечных параметров. Сравним результаты линейной, логистической регрессии, алгоритма решающих деревьев. Код в R для функций, реализующих упомянутые алгоритмы, приводится ниже с примером реализации линейной регрессии.

Для реализации алгоритма логистической регрессии необходимо заменить функцию *lm()* в алгоритме Табл 2 на *glm()* и добавить параметр *family=binomial(logit)*, указывающий на тип решаемой задачи. В этом случае получим значение AUC равное 0.6951, что немного лучше, чем 0.6931 при линейной регрессии.

Для построения модели прогноза, оценки и графика в методе решающих деревьев выполнен код, аналогичный приведённому в табл. 2. Отличие заключается в использовании оператора *odel=rpart(tg~,train,method="anova")* вместо оператора линейной регрессии *model=lm(tg~,train)*.

<sup>5</sup> <http://www.rstudio.com/>

Таблица 2 - Алгоритм 1

```

model=lm(tg~.,train)#обучение модели
pr<- predict(model, valid)#построение прогноза
r = roc(valid$tg,pr)#вычисление параметров
ROC кривой
#построение графика
df=data.frame(FPR=(1 - r$specificities),TPR=
r$sensitivities)
p<-ggplot(df,aes(FPR,TPR))+geom_line(size = 1,
alpha = 0.7)+ labs(title= "ROC curve",
x = "False Positive Rate (1-Specificity)",
y = "True Positive Rate (Sensitivity)")
print(r$auc)
print(p)
    
```

Оказалось, что для метода решающих деревьев очень важными параметрами являются: *maxdepth* – максимальная глубина дерева; *minsplit* – минимальное число наблюдений в узле для дальнейшего разбиения. Для выбора оптимальных значений этих параметров были проведены 100 вычислительных экспериментов, выборка их результатов представлена в табл. 3.

Таблица 3 - Выбор оптимальных параметров

<i>maxdepth</i> → <i>minsplit</i> ↓	5	6	7
2	0,788	0,831	<b>0,843</b>
4	0,788	0,831	<b>0,843</b>
6	0,788	0,831	0,828
8	0,788	0,831	0,830
10	0,788	0,831	0,830
12	0,788	0,831	0,831
<i>maxdepth</i> → <i>minsplit</i> ↓	8	9	10
2	0,833	0,819	0,785
4	0,833	0,822	0,792
6	0,823	0,818	0,806
8	0,834	0,826	0,815
10	0,839	0,831	0,820
12	0,829	0,822	0,829

В этой таблице столбцы – значения *maxdepth*, строки – *minsplit*, в ячейках – соответствующие значения показателя AUC при тестировании полученной модели на валидационной выборке. Максимальное значение AUC = 0.843 (выделено жирным шрифтом в таблице) получается при построении решающего дерева с *maxdepth* = 7, *minsplit* = 2 или 4 (рис.2). На визуализированном графе дерева с данными параметрами хорошо видно максимум по семь разбиений на каждой ветви.

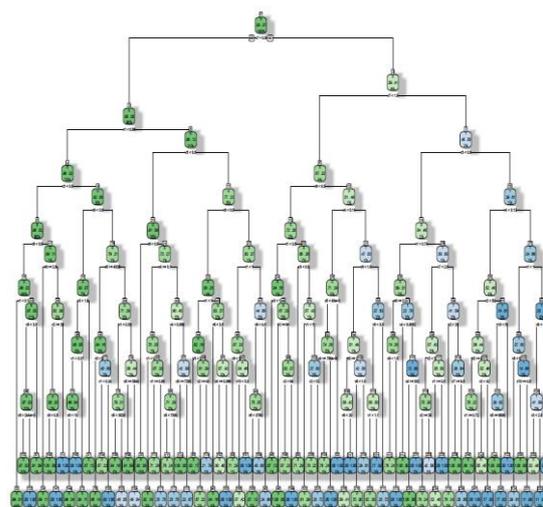


Рисунок 2 - Дерево решений, созданное с помощью функции *rpart* с оптимальными параметрами *maxdepth*, *minsplit*

Зелёные узлы соответствуют значениям целевой переменной равным нулю («хорошие» клиенты), синие – значение целевой переменной = 1 («плохие клиенты»). Сравнение методов приводится на рисунке 3.

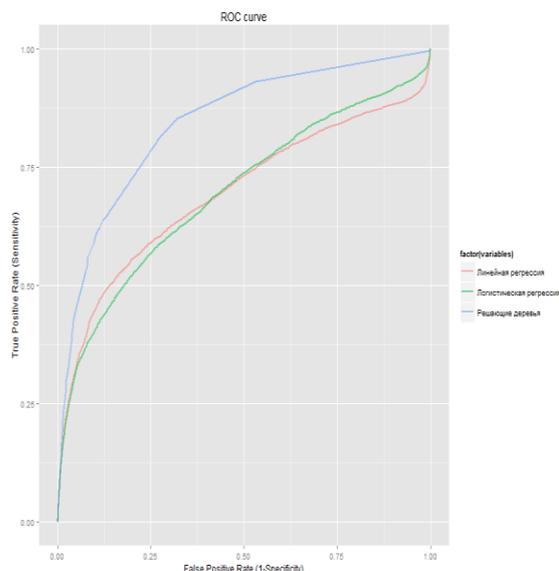


Рисунок 3 - Сравнение ROC-кривых для линейной регрессии, логистической регрессии и решающих деревьев

Здесь приведены результаты сравнения ROC-кривых для линейной регрессии, логистической регрессии и решающих деревьев. Максимальное значение AUC = 0.843 получается при построении решающего дерева с *maxdepth* = 7, *minsplit* = 2 или 4 (рисунок 2). Можно сделать вывод о том, что размер дерева является очень важным параметром, требующий тщательной оптимизации, так как и слишком

большие и слишком маленькие деревья могут обладать слабой эффективностью. Дальнейшее улучшение результатов было достигнуто с помощью бустинга над решающими деревьями. Бустинг (улучшение) – одна из наиболее эффективных техник машинного обучения, разработанных за последние двадцать лет. В основе бустинга лежит процедура объединения множества «слабых» базовых классификаторов (base-learners) с целью получения одного более мощного «ансамбля». С этой точки зрения бустинг очень схож с бэггингом. Бэггинг (bootstrap aggregating) использует параллельное обучение базовых классификаторов (говоря языком математической логики, бэггинг – улучшающее объединение, а бустинг – улучшающее пересечение). Таким образом, бустинг схож с другими методами на основе ансамблирования моделей, но всё же принципиально отличается от них [4].

Бустинг над решающими деревьями по праву считается одним из лучших классификаторов [5]. В среде R для реализации вышеописанного метода может быть использован пакет «gbm»<sup>6</sup> (Generalized Boosted Models). Его алгоритм AdaBoost так же принимает экспоненциальную функцию потерь, но для бустинга использует метод градиентного спуска Фридмана [6] вместо оригинального. В данном случае для прогноза будут использоваться оптимальное число деревьев, полученное с помощью функции *gbm.perf()* – 190. Если посмотреть на результаты обучения модели, то можно убедиться в том, что после 180-200 итераций результат не имеет значительного улучшения. Значение AUC данной модели для 500 деревьев - 0.8605, для 190 - 0.861, что говорит о необходимости использования оптимального числа итераций при построении прогноза.

Для комплексной оптимизации параметров был использован пакет “caret”. Он позволяет построить множество моделей с различными наборами значений регулирующих параметров и автоматически выбрать лучшую из них. В качестве параметров для оптимизации и их соответствующих значений зададим следующие:

- *interaction.depth* = {2, 4, 6, 8, 10};
- *n.trees* = {10, 20, 30, ..., 300};
- *shrinkage* = {0.01, 0.05, 0.1}.

В итоге пакет *caret* создаст 450 моделей и проверит их качество с помощью 5-кратной кроссвалидации, используя при этом значения

AUC. В результате имеем 3 графика (рисунок 4) и таблицу с различными наборами регулирующих параметров (таблица 3). Максимальное значение AUC на этапах кроссвалидации (0.8626) достигается в точке:

*n.trees* = 250, *interaction.depth* = 10 and *shrinkage* = 0.05.

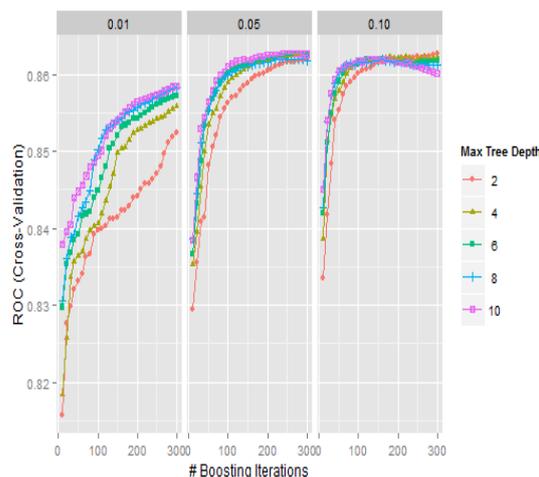


Рисунок 4 - Результаты оптимизации регулирующих параметров с помощью пакета *caret*

На графиках видно, как связаны параметр *interaction.depth*, *shrinkage* и количество итераций:

- *shrinkage* напрямую влияет на динамику качества модели – при больших его значениях лучшие результаты получаются при меньшем количестве итераций;
- при больших значениях *interaction.depth* качество модели изменяется быстрее, как в сторону роста, так и падения, что может быть связано с эффектом переобучением, так как создаются большие деревья.

Исходя из этого, будем использовать следующий набор значений регулирующих параметров для построения модели –

*shrinkage* = 0.1, *n.trees* = 1000

(с поиском оптимального с помощью *gbm.perf()*), *interaction.depth* = 2.

На рис. 4 приведены результаты сравнения вычислительных экспериментов при разных значениях параметров. При тестировании модели с этими параметрами (*shrinkage* = 0.1, *interaction.depth* = 2) на валидационной выборке получим AUC = 0.8644 при оптимальном количестве итераций равным 311. Дальнейшее усовершенствование методики можно получить, используя модель “*xgboost*”<sup>7</sup>, которая в сравнении с “*gbm*” работает в несколько раз быстрее, более эффективно

<sup>6</sup> <http://cran.r-project.org/web/packages/gbm/gbm.pdf>.

<sup>7</sup> <https://github.com/dmlc/xgboost>

использует память компьютера, позволяет работать с разреженными матрицами, настраивать тип целевой функции и оценочную метрику.

• Модель *xgboost* автоматически группирует переменных на три кластера:

- значимые,
- средней значимости,
- наименее значимые.

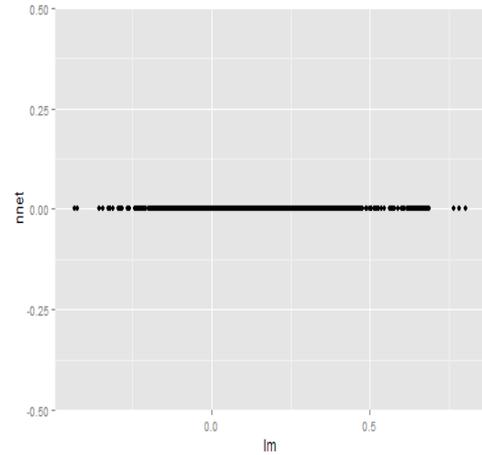
Наибольшую значимость имеют те же переменные, что и в случае для *gbm*.

### Проблема балансировки данных

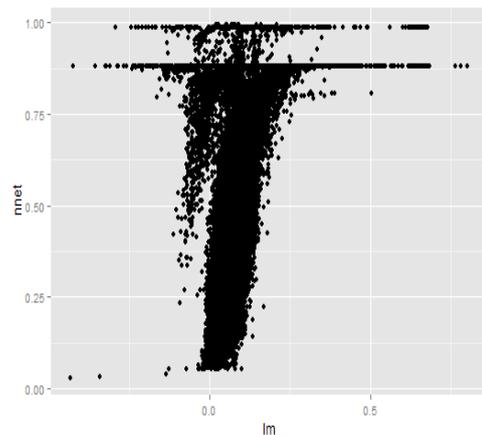
Рассмотрим проблему появления несбалансированности данных, которая может приводить при использовании стандартных алгоритмов к результатам низкого качества [7]. Эта проблема возникла при решении задачи Credit. Отметим, что при использовании стандартных методов в предыдущем разделе мы не сталкивались с проблемой несбалансированности данных, дело в том, что несбалансированность данных негативно сказывается на работе нейронных сетей, так как обученная на выборке, где, как в нашем случае, плохие клиенты в подавляющем меньшинстве, алгоритм нейронной сети игнорирует малочисленный класс. В частности, если построить нейронную сеть на всей обучающей выборке, получим тривиальное нулевое решение с соответствующим результатом  $AUC = 0.5$ . Теперь обучим нейронную сеть, используя сбалансированную выборку. Алгоритм 2 приведен в табл. 4 для сбалансированной выборки. Ключевыми параметрами при формировании сбалансированного подмножества являются  $\alpha$  (alfa в алгоритме) = 0.99 (3302 наблюдений) и  $\beta$  (beta в алгоритме) = 0.1 (4694 наблюдений) – проценты «плохих» и «хороших» клиентов из всей выборки соответственно.

Таблица 4 - Алгоритм 2

```
nr=nrow(train)
ind=matrix(0,nr,1)
alfa=0.99
beta=0.1
for(i in 1:nr){q = runif(1)
  if(train[i,1]==1 && q<=alfa){ind[i,1]=1}
  else{q = runif(1)
    if(train[i,1]==0 && q<=beta){ind[i,1]=1}}
}
model=nnet(tg~.,train[ind==1,], size=1)
pr<- predict(model, valid)
r = roc(valid$tg,pr)
```



а)



б)

Рисунок 5 - Соотношение прогнозов линейной регрессии (ось *lm*) и нейронной сети (ось *nnet*): (а) – несбалансированное подмножество; (б) – сбалансированное подмножества

На графике (рис. 5, б) видно, что в этом случае полученные вероятности ненулевые, а  $AUC$  в таком случае равен 0.8285. Чтобы найти оптимальное число клиентов обоих классов в составе сбалансированного подмножества, необходимо провести несколько экспериментов, используя различные пары параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . На рисунке 6 можно видеть, как меняется значение  $AUC$  при изменении этих параметров.

Для формирования сбалансированного подмножества использовались  $\alpha = 0.85$ ,  $\beta = 0.06$ . Из вычислительных экспериментов для определения оптимальной структуры нейронной сети было получено, что максимальное значение  $AUC$  по всем итерациям составило 0.859 и достигается при семи нейронах скрытого слоя (рис. 7).

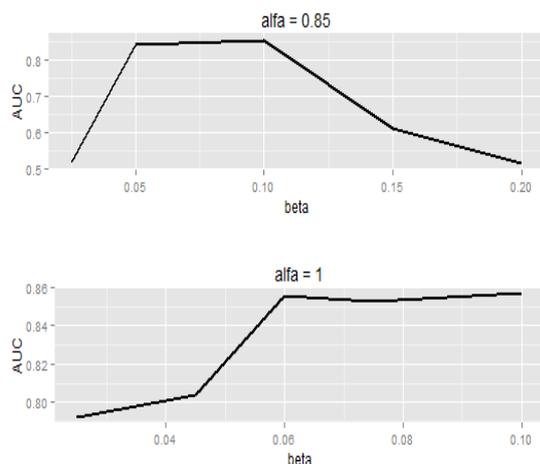


Рисунок 6 - Динамика качества модели в зависимости от различных значений параметра  $\beta$  сбалансированного подмножества

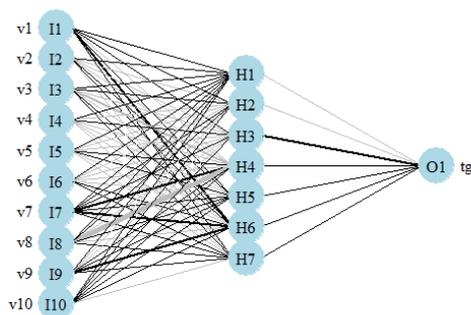


Рисунок 7 - Нейронная сеть с семью нейронами скрытого слоя

Таким образом, наличие несбалансированности в выборках может приводить к крайне низкому качеству классификации данных. Для решения проблемы несбалансированности исходных данных предлагается метод случайных сбалансированных подмножеств. Суть данного метода заключается в множественном построении классификаторов на основе случайно сформированных сбалансированных подмножеств. В силу своей стохастичности, отдельно взятое подмножество не позволяет объективно оценивать качество обучаемого на нём классификатора, поэтому представляется целесообразным использовать метод однородного ансамблирования [8] и в соответствии с ним вычислять решающую функцию как среднее значение большого числа решений, полученных на каждом подмножестве. Обозначим совокупность случайных подмножества как  $RS(\alpha, \beta, n)$ , где  $\alpha$  – число «плохих» клиентов,  $\beta$  – число «хороших»,  $n$  – количество используемых подмножеств, каждое

из которых формируется по следующему правилу:

$$RS(\alpha, \beta, n) = \begin{cases} \xi \leq \alpha \text{ if } y_i = 1 \text{ then minority} \\ \xi \leq \beta \text{ if } y_i = 0 \text{ then majority} \end{cases}$$

где  $\xi$  – непрерывная равномерно распределённая случайная величина на интервале  $\{0,1\}$ . [4, 9]

Важными параметрами при построении данной модели являются  $n$  и  $q = \beta/\alpha \leq 1$  – пропорциональное соотношение клиентов обоих классов, причём значение  $n$  должно быть достаточно большим, а  $q$  не слишком маленьким. В этом случае будут рассматриваться  $n$  случайных подмножеств из всей выборки, каждое из которых включает  $\alpha$  плохих и  $\beta$  хороших клиентов [9].

Так как для отдельно взятого классификатора используется только часть данных, оставшиеся наблюдения можно использовать для проверки качества решения в соответствии принципом скользящего контроля. Таким образом оценочная траектория будет накапливаться параллельно вычислению однородного ансамбля, а усреднённая оценочная траектория будет являться паспортом скользящего контроля (cv-паспортом), соответствующим однородному ансамблю. Структурная схема алгоритма формулируется следующим образом:

- 1) Инициализация параметров алгоритма (8) по параметрам  $\alpha, \beta, n$ .
- 2) Для каждого  $i$  из  $\{1, 2, \dots, n\}$ :
  - сформировать случайное сбалансированное подмножество  $RS(\alpha, \beta, n)$ , согласно правилу (1);
  - построить классификатор, используя  $RS(\alpha, \beta, n)$  в качестве тренировочного множества;
  - получить прогноз для кросс-валидационной выборки (все наблюдения, не вошедшие в  $RS(\alpha, \beta, n)$ ) и оценить качество полученного решения, см. верхний рисунок 6, иллюстрирующий усредненные решения;
  - получить прогноз для валидационной выборки и оценить качество полученного решения по рисунку 6.
- 3) Найти среднее арифметическое всех решений для тестовой выборки (финальное решение)

Всего в ходе работы с данными Credit было использовано шесть разных моделей. Результаты экспериментов представлены в табл.5. Среди использованных алгоритмов лучший результат был получен с помощью *gbm* - 0.8640.

Таблица 5 - Результаты по данным Credit

Модель	Функция в R	Результат AUC
Линейная регрессия	lm()	0.6930
Логистическая регрессия	glm()	0.6951
Решающие деревья	rpart()	0.8430
Gradient boosting machine	gbm()	0.8640
Extreme Gradient Boosting	xgboost()	0.8635
Нейронные сети	nnet()	0.8590

**Эксперименты с данными MNIST**

Проблемы несбалансированных данных возникают в задачах распознавания образов. Рассмотрим в качестве примера данные международного соревнования Digit Recognizer, проводимого на платформе Kaggle. Этот пример относится к области распознавания рукописных цифр. В компьютерной памяти изображения могут быть представлены в форме числовых матриц. Широко известные данные MNIST<sup>8</sup> ("Modified National Institute of Standards and Technology") используются в качестве классического примера для тестирования различных алгоритмов машинного обучения. База данных MNIST включает в себя 42000 тренировочных образов и 28000 тестирующих изображений. Каждое наблюдение (или изображение) из базы данных MNIST представляет собой квадратную матрицу с размерностью 28. На рисунке 8 приведены изображения из базы данных MNIST.

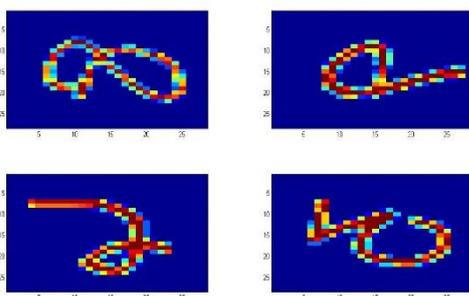


Рисунок 8 - Изображение из базы данных MNIST

Оцифрованное изображение представляет элемент матрицы в диапазоне от 0 (белый цвет) до 255 (черный цвет). Промежуточные значения представляют цвета стандартной палитры из 256 оттенков. В качестве критерия алгоритма распознавания рассматривается точность

классификации. Например, результат равный 0.97 означает, что правильно классифицированы все изображения, кроме 3%. В качестве основного метода мы использовали метод опорных векторов (SVM). Метод SVM выигрывает от нормализации признаков. В среде R метод опорных векторов реализован в пакете e1071<sup>9</sup>. Обучение модели производится с использованием функции svm:

```
svm(tg~., data=X, kernel = "radial",
degree = 3, gamma = 1 / ncol(x),
coef0 = 0)
```

Для того чтобы распознать изображение, следует найти максимальный элемент в каждой строке. Важной особенностью алгоритма является нормализация исходных данных – мы снижаем разброс чисел путём деления каждого элемента на максимум по столбцу. Если выполнять алгоритм без нормализации, то алгоритм не производит классификацию, и все результаты AUC в этом случае равны 0.5. Для достижения лучшего результата при использовании метода SVM были проведены вычислительные эксперименты, в которых менялись параметры в соответствующих сериях (kernel): "radial", "linear", "sigmoid", "polynomial". Результаты экспериментов показывают, что из 4 ядер пакета SVM наибольший процент верно классифицированных образцов показывает ядро "polynomial"(0.9919898). Наихудший результат у ядра "linear". Всего для решения задачи классификации использовались следующие алгоритмы машинного обучения:

- Случайный лес (randomForest)
- k ближайших соседей (knn)
- Метод опорных векторов (SVM)
- H2O: Deep Learning

Полученные значения AUC, для каждой модели представлены табл. 6.

Таблица 6 - Результаты экспериментов

Алгоритм	Функция	AUC
Случайный лес	randomForest()	0.9911
k ближайших соседей	knn()	0.9759
Опорные вектора	svm()	0.9919
H2O: Deep Learning	h2o.deeplearning()	0.9880

<sup>8</sup> <http://yann.lecun.com/exdb/mnist>.

<sup>9</sup> <http://cran.r-project.org/web/packages/e1071/index.html>.

Метод SVM с использованием нормализации дает наилучшее среди всех алгоритмов качество классификации (0.9919).

### **Заключение**

В рамках данной статьи мы рассмотрели два примера, на которых демонстрировались возможности использования соревновательных задач для применения комплексной методики применения технологий анализа данных для получения наилучших результатов. Главный контекст этой методики состоит в том, что мотивация происходит в процессе соревнования: каждый участник имеет возможность сравнить свой результат с результатами других участников, при этом он ищет свои пути улучшения результатов. Выше мы обращали внимание на индивидуальные особенности задач, однако в определенной степени удаётся выделить общие принципы при создании моделей. Основным выводом из полученных результатов является то, что любая модель требует тщательной настройки и адаптации под используемые данные [8, 9]. Для этого в ходе экспериментов с моделями следует учитывать как особенности самого алгоритма, так и особенности обучающей выборки. В частности, сбалансированность классов в ней является крайне важным фактором, необходимым для стабильной работы многих классификаторов. Как выяснилось, меньше всего от этой проблемы страдают модели, основанные на решающих деревьях, больше всего – нейронные сети и логистическая регрессия [10-12]. Исходя из того, что вышеперечисленные алгоритмы имеют разную природу, объединение их в один ансамбль позволяет сделать финальную модель более общей, способной сгладить отрицательные и объединить положительные особенности предсказаний вошедших в неё классификаторов, и, как следствие, улучшить финальный результат, что особенно важно в рамках оценки кредитоспособности, так как, чем точнее модель, тем ниже риск принятия на её основе неправильного решения, которое, в свою очередь, может привести к ошибочным выводам в процессе принятия решений. За время реализации учебной программы наши студенты принимали участие в десятках соревнований различного уровня, добиваясь высоких результатов. Вот лишь некоторые из них: «Give me some Credit», «Digit Recognizer», «Netflix Prize», «Predict Movie Ratings», «Web Science Recommender System», «ITMO year2012, 2013, 2015 ML RecSys», «Movie Recommendation», «T12736-C: Datamining Project», «Football data challenge», «Прогноз визитов (ММП, ВМК,

МГУ)», «Leaf Classification», «Right Whale Recognition», «Santander» и другие. Важным обстоятельством является также возможность повысить свою квалификацию, получая доступ к ресурсам Kaggle в виде обучающих курсов и программ. Для этого служит вкладка Faster Data Science Education, доступ к ней осуществляется из главного меню Kaggle<sup>10</sup>. Практические навыки в DM можно получить в свободных микрокурсах: Python, Machine Learning, Pandas, Deep Learning, Data Visualization.

### **Литература**

1. Атхит, М. Технология разработки экспериментально-исследовательских задач для дистанционных конкурсов // Компьютерные инструменты в образовании, 2016. – №1. - С. 48–60.
2. James, G. R. An Introduction to Statistical Learning with Applications / G. R James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. - New York: Springer, 2013. - 426 p.
3. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
4. Nikulin, V. On the Evaluation of the Homogeneous Ensembles with CV-passports // PAKDD 2013. - LNCS 7867 Springer 7867, J. Li et.al. (Eds.). – PP. 109-120.
5. Freund, Y. A. Short Introduction to Boosting / Y. A. Freund, R. E. Schapire // Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence, 1999. - Vol.14. - N5. – PP. 771-780.
6. Никулин, В. Н. Об однородных ансамблях при использовании метода бустинга в приложении к классификации несбалансированных данных / В. Н. Никулин, С. А. Палешева, Д. С. Зубарева // Вестник Пермского Университета. Сер. Экономика, 2012. - Том 15. - №4. - С. 8-14.
7. Friedman, J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting // The Annals of Statistics, 2001. - Vol. 29. - No. 5. - PP. 1189-1232.
8. Nikulin, V. On a solution for the high-dimensionality-small-sample-size regression problem with several different microarrays // Int. J. Data Mining and Bioinformatics, 2014. - Vol. 9. - No 3. - PP. 221-235.
9. Никулин, В. Н. Методы балансировки и нормализации данных для улучшения качества классификации / В. Н. Никулин, И. С. Канищев, И. В. Багаев // Компьютерные инструменты в образовании, 2016. - №3. - С. 16-24.

<sup>10</sup> <https://www.kaggle.com/learn/overview>

10. Багаев, И. В. Алгоритм наивного метода Байеса в задачах бинарной классификации на примере набора SANTANDER с платформы Kaggle / В.И.Багаев, М. Д. Коломенская, А. В. Шатров // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сб. ст. по материалам Четвертой всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 14–18 мая 2018 г.) Ч. I. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2019. - С. 32-36.

11. Пашенко, Д. Э. Технологии анализа данных: классификация, предварительная обработка, эксперименты с моделями / Д. Э. Пашенко, А. В. Шатров //

Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сб. ст. по материалам Четвертой всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 14–18 мая 2018 г.) Ч. 2. / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2019. - С. 31-35.

12. Пашенко, Д. Э. Сравнение классических моделей с моделями, построенными с помощью продвинутых методов машинного обучения / Д. Э. Пашенко, А. В. Шатров // Advanced Science, 2019. - N 1. - С. 24-28.

**Багаев И. В., Канищев И. С., Охупкин В. П., Шатров А. В. Опыт участия в международных соревнованиях по анализу данных как способ стимулирования исследовательских навыков обучающихся.** Анализ данных востребован для различных областей науки и большого числа прикладных исследований в промышленности, образовании и экономике. В данной работе рассматривается опыт обучения магистров по специальности «Прикладная информатика», магистерская программа «Анализ данных». Особое внимание уделяется тому, как привлечь обучающихся к активному участию в научных исследованиях. Такую возможность предоставляет система международных соревнований по анализу данных среди студенческих команд Data Mining Cup, а также платформа Kaggle.

**Ключевые слова:** анализ данных, машинное обучение, международные соревнования.

**Bagaev I. V., Kanishchev I. S., Okhapkin V. P., Shatrov A. V. Experience in international data analysis competitions as a way of stimulating learners' research skills.** Data Analysis is in demand for various fields of science and a large number of applied research in industry, education and economics. This paper discusses the experience of training masters in the specialty "Applied Informatics", the master program "Data Analysis". Particular attention is paid to how to attract students to actively participate in research. This feature is provided by system of international competitions Data Mining Cup in the Data Analysis and the Kaggle platform.

**Keywords:** data analysis, machine learning, international data analysis competitions

Статья поступила в редакцию 10.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А. Я.

УДК 681.5

## Нечеткая искусственная нейронная сеть без правил в системе управления установкой обработки воды электромагнитным полем

Е. Е. Бизянов, Р. Н. Погорелов  
Донбасский государственный технический институт

e-mail: pogorelovrn@gmail.com

### Аннотация

*В статье представлен принцип построения системы управления преобразователем, входящим в состав установки обработки воды электромагнитным полем на основе нечеткой искусственной нейронной сети. Нечеткую искусственную нейронную сеть предложено формировать на основе нечеткого персептрона без правил: первые два слоя нейронной сети являются общими для всех входных сигналов, а остальные слои формируют сигналы на амплитуду и спектральный состав электромагнитного поля. Предложена система показателей для контроля качества обработки воды электромагнитным полем, приведены ограничения, которые следует учитывать при проектировании системы управления преобразователем для установки электромагнитной обработки воды. Предложена структура системы управления, а также рекомендации по настройке ее параметров.*

### Введение

Одной из важнейших задач водоподготовки является удаление солей жесткости. Широко используемые в настоящее время химические методы снижения жесткости, с одной стороны, позволяют произвести глубокую обработку воды, однако, с другой стороны, способствуют дальнейшему загрязнению природных вод и требуют значительных затрат на оборудование, расходные материалы, персонал и логистику [1]. Поэтому с точки зрения минимизации влияния на окружающую среду, а также снижения затрат на водоподготовку, предпочтение следует отдать физическим методам, к которым относится обработка воды магнитным полем [2]. В настоящее время используют как постоянное магнитное поле, создаваемое редкоземельными магнитами, так и переменное электромагнитное поле, создаваемое системой катушек [3]. Установки с постоянными магнитами просты в изготовлении и эксплуатации, однако в них сложно производить подстройку параметров поля при изменении физико-химических показателей воды, что не всегда гарантирует наилучшую обработку [4]. Воздействие же на воду переменным электромагнитным полем позволяет изменять его амплитуду и частоту в широких пределах, и, таким образом, дает возможность получать оптимальные результаты обработки [5].

Исследования воздействия магнитного поля на воду проводились отечественными учеными еще в 60–80-х годах XX века [2] и

продолжаются в настоящее время. Однако до сих пор не были предложены конкретные рекомендации по выбору напряженности и частоты электромагнитного поля. Так, например, рекомендуемый в [2] диапазон напряженности поля 1–100 кА/м слишком широк и не привязан к конкретным показателям исходной воды, что усложняет практическое применение электромагнитной обработки последней.

Результаты исследований, приведенные в [1, 2], показывают, что качество обработки магнитным полем зависит от следующих физико-химических показателей: исходной жесткости и температуры воды, скорости ее перемещения в магнитном поле, концентрации растворенных в ней газов, водородного показателя воды  $pH$ , а также амплитуды напряженности и частоты магнитного поля.

Неопределенность физико-химических показателей исходной воды, а также сложность их взаимовлияния говорит о необходимости создания установки, способной задавать параметры электромагнитного поля, воздействующего на воду, обеспечивающие наилучший результат.

Целью данной работы является разработка принципа построения (структуры и метода настройки) адаптивной системы управления преобразователем для установки обработки воды электромагнитным полем.

### Постановка задачи

Примем за показатель качества воды  $Q$  содержание в ней солей жесткости. Известно, что

все физико-химические показатели воды взаимосвязаны. Так, например, жесткость зависит от водородного показателя рН и концентрации растворенных газов: кислорода и углекислого. Электропроводность воды однозначно отражает общую жесткость. Поэтому для контроля качества исходной воды достаточно будет измерить ее температуру  $T^0$ , скорость движения  $v$  и электропроводность  $\gamma$ . Поэтому как задачу электромагнитной обработки воды будем рассматривать получение минимально возможной жесткости:

$$Q(T^0, v, \gamma) \rightarrow n \quad (1)$$

где  $Q$  – качество выходной (обработанной) воды,  $T^0$  – температура воды на входе в камеру обработки воды (далее – омагничиватель),  $v$  – скорость перемещения воды в магнитном поле,  $\gamma$  – электропроводность исходной воды.

При проектировании системы управления следует учитывать следующие ограничения:

1. Максимально возможная амплитуда магнитного поля  $H_{max}$  и максимальная частота

спектра  $f_{max}$  ограничены параметрами полупроводниковых вентилях преобразователя.

2. Параметры  $f_4$  и  $t$  взаимосвязаны, причем спектральный состав кривой тока на выходе преобразователя может изменяться только дискретно [6].

3. Физико-химические показатели обрабатываемой воды изменяются во времени достаточно медленно (от единиц часов до суток) [1], причем время изменения любого из показателей на несколько порядков выше любого из запаздываний, вносимых датчиками. Поэтому запаздываниями, вносимыми датчиками, можно пренебречь.

### Реализация системы управления

Установка для обработки воды электромагнитным полем (см. рис. 1) состоит из преобразователя электрической энергии, формирующего многофазный ток, модулированный несколькими частотами, в катушках омагничивателя, и системы управления, которая принимает сигналы от датчиков и формирует сигналы управления вентилями преобразователя.

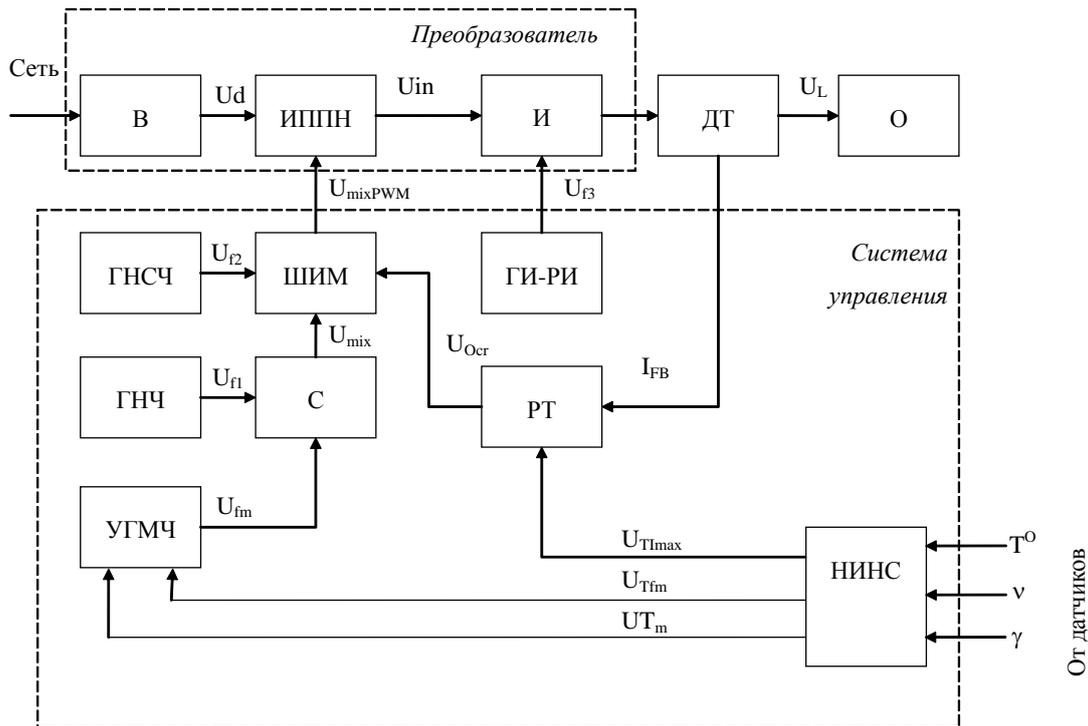


Рисунок 1 – Структурная схема установки для обработки воды электромагнитным полем.

Преобразователь обеспечивает в активно-индуктивной нагрузке (катушках омагничивателя О) ток заданной амплитуды и заданного спектрального состава. Спектральный состав задается алгоритмически, путем управления вентилями преобразователя таким

образом, чтобы в спектре присутствовали гармоники с фиксированными частотами:  $f_1 = 8,2$  Гц,  $f_2 = 15,192$  кГц и  $f_3 = 64$  кГц, а также гармоника с изменяемой частотой  $f_4 = 100 \dots 1000$  Гц, причем амплитуды гармоник с частотами 8,2 Гц и 100...1000 Гц регулируются

за счет изменения коэффициента модуляции [6].

Частоты  $f_1, f_2, f_4$  в спектре ЭМП формируются импульсным преобразователем постоянного напряжения (ИППН), а частота  $f_3$  – инвертором И. Питание ИППН производится от выпрямителя В, подключенного к сети переменного тока.

Ввиду отсутствия однозначных зависимостей показателей обрабатываемой воды от параметров воздействующего на нее электромагнитного поля предлагается построить систему управления преобразователем на базе нечеткой искусственной нейронной сети типа нечеткого персептрона без правил [7], которая обеспечит адаптацию параметров ЭМП в условиях неопределенности взаимосвязи показателей обрабатываемой воды и электромагнитного поля. Единственный контур управления, который можно построить по классической схеме [8], это контур регулирования амплитуды тока в катушках омагничивателя. Для регулирования амплитуды тока в катушках омагничивателя установлен датчик тока ДТ, выходной сигнал  $I_{FB}$  которого поступает на один из входов регулятора тока РТ, на второй вход которого подается сигнал задания на амплитуду тока  $U_{Tmax}$ , сформированный нечеткой искусственной нейронной сетью НИНС.

Отметим, что система управления построена на основе микроконтроллера, поэтому указанные на рис. 1 модули реализованы программно.

В систему управления встроены три генератора: генератор импульсов с распределителем импульсов ГИ–РИ (формирующий сигнал  $U_{f3}$  с частотой  $f_3 = 64\text{кГц}$ ) для управления многофазным преобразователем (инвертором И); генератор несущей частоты ГНЧ для широтно–импульсного модулятора (ШИМ), формирующий сигнал  $U_{f2}$  с частотой  $f_2 = 15,192\text{кГц}$ ; генератор нижней частоты ГНЧ, формирующий сигнал  $U_{f1}$  с частотой  $f_1 = 8,2\text{Гц}$ ; а также управляемый генератор модулирующей частоты УГМЧ, формирующий сигнал  $U_{fm}$  с частотой  $f_m = 100 \dots 1000\text{Гц}$ . Сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_4$  суммируются в смесителе С, в результате чего на выходе смесителя получаем однополярный сигнал  $U_{mix}$ :

$$U_{mix} = |U_{MIXmax} [m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t) + (1 - m) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)]|, \quad (2)$$

являющийся сигналом задания для широтно–импульсного модулятора ШИМ, причем амплитуда выходного сигнала смесителя  $U_{MIXmax}$  определяется выходным сигналом  $U_{Ocr}$  регулятора тока РТ.

На входы НИНС которой подаются сигналы от датчиков: температуры  $T^o$ , скорости

движения воды в омагничивателе  $v$  и проводимости исходной воды  $\gamma$ . НИНС вырабатывает три сигнала: задание на амплитуду тока  $U_{Tmax}$ , задание на частоту модуляции  $U_{Tfm}$  и задание на коэффициент модуляции  $U_{Tm}$ .

### Принцип построения многослойной нечеткой искусственной нейронной сети без правил

Нечеткая искусственная нейронная сеть состоит из четырех слоев (рис. 2). Нулевой слой – слой входных переменных, и первый слой – слой фаззификации, являются общими.

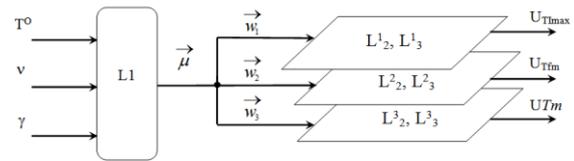


Рисунок 2 – Структура НИНС

Первый слой представлен девятью функциями принадлежности (по три на каждую входную переменную).

На выходе первого слоя получаем вектор  $\vec{\mu}$ , содержащий значения принадлежности для входных переменных:

$$\vec{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_1(T^o), \mu_2(T^o), \mu_3(T^o), \\ \mu_1(v), \mu_2(v), \mu_3(v), \\ \mu_1(\gamma), \mu_2(\gamma), \mu_3(\gamma) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Затем вектор  $\vec{\mu}$  умножается на векторы  $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \vec{w}_3$ , содержащие весовые синаптические коэффициенты:

$$\vec{\mu} \times \vec{w}_1, \vec{\mu} \times \vec{w}_2, \vec{\mu} \times \vec{w}_3, \quad (4)$$

и поступает на вторые и третьи слои  $L^j_2, L^j_3, j=1,3$ , в которых формируются значения сигналов для системы управления: амплитуды тока в катушках омагничивателя  $U_{Tmax}$ , частоты модуляции  $U_{Tfm}$  и коэффициента модуляции  $U_{Tm}$ .

Для пояснения структуры НИНС рассмотрим ее фрагмент, формирующий сигнал задания на амплитуду тока  $U_{Tmax}$ , представленный на рис. 3. Как видно из рис.3, второй слой НИНС представлен тремя сумматорами, на входы которых подаются сигналы  $\vec{\mu} \times \vec{w}_1, \vec{\mu} \times \vec{w}_2, \vec{\mu} \times \vec{w}_3$ . Выходные сигналы второго слоя умножаются на вектор синаптических весов  $\vec{w}_2$ , и подаются на входы сумматора третьего слоя, выходным сигналом которого является  $U_{Tmax}$ .

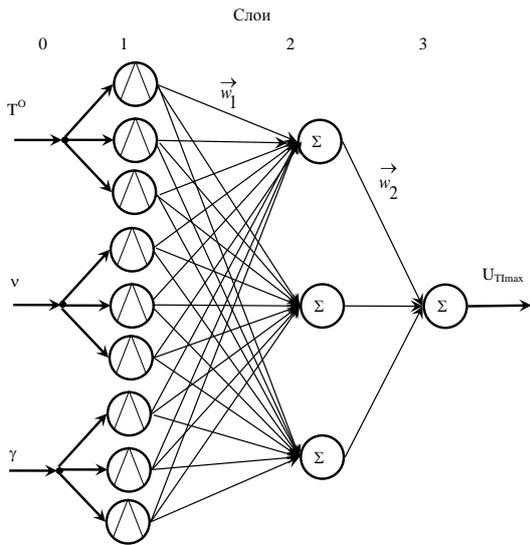


Рисунок 3 – Структура фрагмента НИНС для одного параметра

Таким образом, сигнал можно записать следующими формулами:

$$U_{T_{\max}} = \sum_{i=1}^3 HL_i^2 \times w_2 \quad (5)$$

$$HL_i^2 = \sum_{j=1}^3 HL_j^1 \times w_1$$

$$\begin{aligned} HL_1^1 &= T^0 \cdot \mu_1(T^0); HL_2^1 = T^0 \cdot \mu_2(T^0); HL_3^1 = T^0 \cdot \mu_3(T^0); \\ HL_4^1 &= v \cdot \mu_1(v); HL_5^1 = v \cdot \mu_2(v); HL_6^1 = v \cdot \mu_3(v); \\ HL_7^1 &= \gamma \cdot \mu_1(\gamma); HL_8^1 = \gamma \cdot \mu_2(\gamma); HL_9^1 = \gamma \cdot \mu_3(\gamma); \end{aligned} \quad (6)$$

Для реализации НИНС необходимо сформировать функции принадлежности для входных переменных  $T^0$ ,  $v$  и  $\gamma$ . Используем в качестве функций принадлежности треугольные нечеткие числа [9], что обусловлено простотой их математической обработки, а также тем, что, треугольное нечеткое число представляет величину типа «приблизительно равно», что достаточно полно отражает характер неопределенности параметров воды. [10].

На рис. 4 приведен пример лингвистического терм-множества для входной переменной «температура».

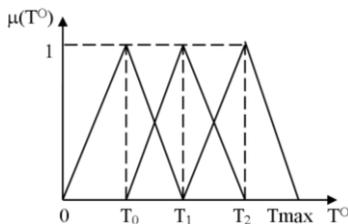


Рисунок 4 – Лингвистическая переменная «температура»

Значения температуры  $T = 0$  и соответствуют теоретическим значениям минимально и максимально возможной

температуры воды на входе в омагничиватель, точки  $T_0$  и  $T_2$  соответствуют реальным минимально и максимально возможным значениям температуры воды, а значение  $T_1 = (T_0 + T_2)/2$ .

Аналогичным образом функции принадлежности следует построить и для входных показателей  $v$  и  $\gamma$ .

Настройка параметров НИНС заключается в нахождении элементов векторов синаптических весов  $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \vec{w}_3$ .

Первичная настройка (обучение НИНС) осуществляется на основе экспериментальных данных.

Перенастройка НИНС производится в случае отклонения показателя качества  $Q$  на заданную величину погрешности  $\Delta Q$ . В случае появления отклонения производится еще два измерения при тех же параметрах ЭМА. Если имеется тенденция к увеличению  $\Delta Q$ , производится коррекция параметров ЭМП  $H_{\max}$ ,  $f_m$  и  $m$  с использованием принципа экстремальной настройки [6]. После того, как величины  $H_{\max}$ ,  $f_m$  и  $m$ , соответствующие условию (1), найдены, производится расчет синаптических весов НИНС - элементов векторов  $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \vec{w}_3$ . Полученные значения новых синаптических весов записываются в память микроконтроллера.

Данные о текущих значениях показателей воды, величине напряженности поля и его спектральном составе и о настройках нейронной сети целесообразно хранить в памяти микроконтроллера в виде кортежей:

$$\langle T^0, v, \gamma, Q, H_{\max}, f_m, m, [N] \rangle, \quad (4)$$

где  $[N]$  – массив настроек искусственной нейронной сети, содержащий значения элементов векторов  $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \vec{w}_3$ , записанных последовательно.

## Выводы

Особенностью управления обработкой воды электромагнитным полем является неопределенность взаимосвязи между параметрами обрабатываемой воды и воздействующего электромагнитного поля. Для получения минимального снижения жесткости воды необходимо обеспечить соответствующие напряженность и спектральный состав электромагнитного поля. Включение в состав системы автоматического управления нечеткой искусственной нейронной сети без правил позволяет обеспечить управление параметрами электромагнитного поля в случае неопределенности параметров исходной воды.

Переобучение НИС производить только в случае наличия тенденции выхода показателя качества за границы заданного отклонения.

### Литература

1. Водоподготовка: Справочник. / под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С. Е. Беликова. – Москва : Аква-Терм, 2007. – 240 с.
2. Классен, В. И. Омагничивание водных систем / В. И. Классен; Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Химия, 1982. – 296 с.
3. Тебенихин, Е. Ф. Обработка воды магнитным полем в теплоэнергетике / Е. Ф. Тебенихин, Б. Т. Гусев. – М., «Энергия», 1970. – 144 с. с ил.
4. Кульский, Л. А. Магнитное поле и процессы водообработки / Л. А. Кульский, С. С. Душкин; под ред. Кульского Л. А. // Киев: Наук. думка, 1987. – 112 с.
5. Миненко, В. И. Электромагнитная обработка воды в теплоэнергетике / В. И. Миненко. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 97 с.

6. Бизянов, Е. Е. Управление спектральным составом выходного тока преобразователя для электромагнитной обработки воды / Е. Е. Бизянов, Р. Н. Погорелов // Техническая электродинамика. Тематический выпуск “Силовая электроника и энергоэффективность”, 2012. – Ч.3. – С. 103–106.

7. Бизянов, Е. Е. Нечеткая искусственная нейронная сеть без правил для задач прогнозирования и управления / Е. Е. Бизянов, А. А. Гутник, Р. Н. Погорелов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки, 2021. – № 1. – С. 78–85.

8. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 751 с. : ил.

9. Растринин, Л. А. Системы экстремального управления / Л. А. Растринин. – М.: Наука, 1974. – 631 с.

10. Третьяков, Ю. М. Структура воды и теплофизические параметры / Ю. М. Третьяков. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – 114 с.

*Бизянов Е. Е., Погорелов Р. Н. Нечеткая искусственная нейронная сеть без правил в системе управления установкой обработки воды электромагнитным полем. В статье представлен принцип построения системы управления преобразователем, входящим в состав установки обработки воды электромагнитным полем на основе нечеткой искусственной нейронной сети. Нечеткую искусственную нейронную сеть предложено формировать на основе нечеткого перцептрона без правил: первые два слоя нейронной сети являются общими для всех входных сигналов, а остальные слои формируют сигналы на амплитуду и спектральный состав электромагнитного поля. Предложена система показателей для контроля качества обработки воды электромагнитным полем, приведены ограничения, которые следует учитывать при проектировании системы управления преобразователем для установки электромагнитной обработки воды. Предложена структура системы управления, а также рекомендации по настройке ее параметров.*

**Ключевые слова:** электромагнитная обработка воды, нечеткая логика, искусственная нейронная сеть, система управления, преобразователь.

*Bizyanov Y. Y., Pogorelov R. N. Fuzzy artificial neural network without rules in the control system of a water treatment by electromagnetic field. The paper presents a design concept for a converter's control system being a part of the electromagnetic water treatment plant that based on a fuzzy artificial neural network. A fuzzy artificial neural network proposed to form on the basis of a fuzzy perceptron without rules: the first two layers of the neural network are common for all input signals, and the remaining layers form signals for the amplitude and spectral composition of the electromagnetic field. The indicators system for monitoring the quality of electromagnetic water treatment is proposed. The control system structure and recommendations for adjusting its parameters are proposed.*

**Keywords:** electromagnetic water treatment, fuzzy logic, artificial neural network, control system, converter.

Статья поступила в редакцию 10.05.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Математическое моделирование и анализ параметров процесса пневматической обработки угольного пласта

Л. А. Лазебная

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

e-mail: [L.Lazebnay@mail.ru](mailto:L.Lazebnay@mail.ru)

### Аннотация

*Предварительная обработка угольных пластов жидкостями и газами является одним из основных средств решения проблемы борьбы с опасными явлениями в шахтах. Пневматическая обработка неувлажненного угольного пласта направлена на интенсификацию дегазации пласта и окислительную дезактивацию угля в массиве. В данной статье рассматривается задача формирования математической модели процесса движения газовой смеси в угольном пласте. Основу математической модели составляет краевая задача для системы уравнений, описывающих процесс принудительной фильтрации компонентов газообразной смеси в анизотропной сплошной среде.*

### Актуальность

В комплексе методов решения задач борьбы с основными опасностями при подземной добыче угля очень важное место занимают процессы воздействия на угольные пласты, позволяющие изменить их состояние и за счет этого снизить интенсивность проявления опасных и вредных свойств [1, 2].

В числе способов воздействия выделяются технологические (схемы вскрытия, системы разработки, порядок отработки пластов, управление проявлениями давления горных пород, системы проветривания) и специальные (предварительное гидравлическое воздействие, увлажнение, пневматическое, физико-химическое воздействие, дегазация, комплексное воздействие). Недостаточная эффективность гидравлической обработки приводит к необходимости изыскания новых способов воздействия. Одним из таких способов является пневматическая обработка неувлажненного угольного пласта. На основе теоретического анализа основных физико-химических процессов, происходящих в массиве при нагнетании воздуха, пневматическая обработка угольного пласта может стать эффективным способом борьбы с газом и эндогенными пожарами в шахтах.

Теоретические и экспериментальные исследования пневматической обработки неувлажненного угольного пласта показали возможность интенсификации выноса метана по сравнению с дегазацией скважинами, также позволили раскрыть механизм ряда физико-химических процессов, приводящих к снижению газоносности пласта и химической активности угля при нагнетании воздуха. Однако отсутствие количественных характеристик протекающих

при нагнетании процессов и малый объем экспериментальных данных не позволили до настоящего времени разработать эффективный режим и определить рациональные параметры пневматического воздействия.

В связи с этим, совершенствование пневматической обработки угольных пластов как способа борьбы с газом в угольных шахтах предполагает, в первую очередь, детальное исследование процессов происходящих в системе «уголь - метан - воздух». При нагнетании воздуха в угольный пласт имеет место ряд сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов. Характерные отличия фильтрации воздуха в угле от фильтрации воды обусловлены следующими особенностями воздуха и угольного пласта: сжимаемость воздуха, высокая сорбционная активность угля по отношению к кислороду воздуха, способность угля к окислению и самонагреванию при соприкосновении с кислородом [3, 4, 5].

Эти отличия, а также общие закономерности фильтрации газов в трещиновато-пористых средах определяют основные физико-химические процессы, происходящие при нагнетании воздуха в угольный пласт:

- фильтрация метано-воздушной смеси;
- десорбция метана и его диффузия из пористых блоков в фильтрационный объем;
- диффузия и сорбция кислорода из потока воздуха;
- окисление и в определенных условиях нагревание угля.

Для разработки математической модели необходимо определить конкретную технологическую схему пневматической обработки, что позволит осуществить

постановку краевых условий и принять необходимые допущения [6, 7].

Согласно предыдущим исследованиям, пневматическая обработка угольного пласта производится через серию скважин, пробуренных из подземных выработок, причем четные скважины являются нагнетательными, а нечетные – отточными скважинами, которые предназначены для выноса из пласта метано-воздушной смеси. Следует отметить, что такая схема пригодна только для пластов с небольшой мощностью, поскольку в противном случае не будет обеспечен эффективный отвод метано-воздушной смеси в отточную скважину (рис. 1).

В дальнейшем будем считать, что пневматическая обработка осуществляется через длинные скважины, пробуренные из подготовительных выработок параллельно линии очистного забоя, причём расстояние между скважинами значительно превышает мощность пласта, что позволяет принять допущение об одномерности фильтрационного потока от нагнетательной скважины к отточной.

Цель работы - обоснование принципов построения математической модели процесса движения газозвушной смеси в угольном пласте..

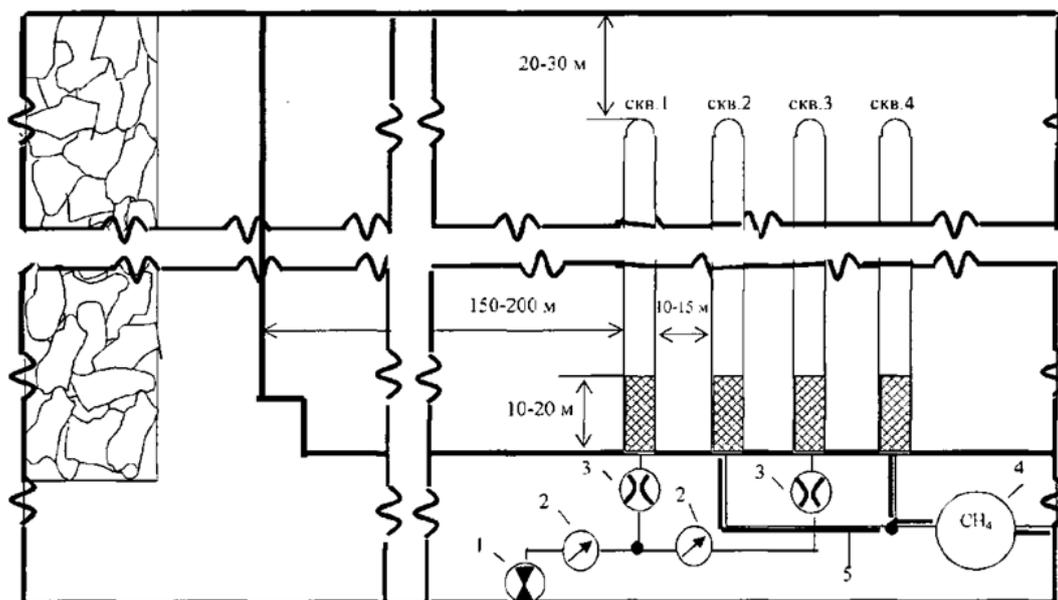


Рисунок 1 – Основной вариант технологической схемы пневматической обработки угольного пласта: 1 – компрессор; 2 – манометр; 3 – счетчик расхода воздуха; 4 – измеритель концентрации метана (газоанализатор); 5 – шахтный газопровод.

### Теоретические предпосылки к разработке математической модели процесса

Считая, что движение газовой смеси подчиняется закону Дарси, и, используя уравнения неразрывности для компонентов потока, запишем уравнения фильтрации газов относительно их концентрации [7, 8]

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} \left[ \frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C \text{grad}(CR) \right] - W_M - W_o, \quad (1)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C_M}{\partial t} = \text{div} \left[ \frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C_M \text{grad}(CR) \right] - W_M, \quad (2)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C_o}{\partial t} = \text{div} \left[ \frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C_o \text{grad}(CR) \right] - W_o, \quad (3)$$

где  $C$  - концентрация газа в фильтрационном объёме,  $\text{г/см}^3$ ;  $T$  - абсолютная температура смеси газов,  $\text{К}^\circ$ ;  $\mu$  - вязкость смеси,  $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$ ;  $R$  - газовая постоянная,  $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$ ;  $W$  - скорость притока газа из пористых блоков в фильтрационный объём,  $\text{г/см}^2\cdot\text{с}$ ; « $M$ », « $o$ » – индексы, относящиеся соответственно к метану и кислороду; переменная без индексов относится к метано-воздушной смеси.

Вязкость и газовая постоянная метано-воздушной смеси зависят от её состава, то есть от соотношений концентрации метана и воздуха в каждой точке. Согласно [6], значения вязкости и газовой постоянной смеси вычисляются по

формулам:

$$\mu = \frac{\delta_M \mu_M \sqrt{M_M T_{кр.м}} + \delta_g \mu_g \sqrt{M_g T_{кр.г}}}{\delta_M \sqrt{M_M T_{кр.м}} + \delta_g \sqrt{M_g T_{кр.г}}}, \quad (4)$$

$$R = \frac{R_{УН}}{\delta_M M_M + \delta_g M_g}, \quad (5)$$

где  $\delta_M, \delta_g$  – объёмные доли метана и воздуха в смеси;  $R_{УН}$  – универсальная газовая постоянная;  $M_M, M_g$  – молекулярные веса метана и воздуха;  $T_{кр.м}, T_{кр.г}$  – критические температуры метана и воздуха.

Объёмные доли метана и воздуха в метано-воздушной смеси можно определить таким образом:

$$\delta_M = \frac{C_M \cdot \rho_{ВНУ}}{C_M \cdot \rho_{ВНУ} + (C - C_M) \cdot \rho_{ВНУ}}, \quad (6)$$

$$\delta_g = 1 - \delta_M,$$

где  $\rho_{ВНУ}$  – плотность воздуха при нормальных условиях.

В пределах давлений, развиваемых при пневматической обработке, вязкость газов незначительно изменяется с увеличением давления, поэтому можно считать эту величину несущественной.

Давление, под которым находится в фильтрационном объёме метано-воздушная смесь, оказывает существенное отрицательное влияние на скорость диффузии метана. На основе результатов исследований разных авторов по диффузии в сжатых газах [3], зависимость коэффициента  $\alpha_M$  от давления приближённо можно выразить формулой

$$\alpha_M = 9 \cdot 10^{-1} \frac{\alpha_M^0}{P} P_{атм} = 0,9 \cdot 10^2 \frac{n_3}{CRT} \alpha_M^0. \quad (7)$$

где  $\alpha_M^0$  – величина  $\alpha_M$ , замеренная при атмосферном давлении, 1/с;  $P$  – давление смеси газов в фильтрационном объёме, МПа;  $P_{атм}$  – атмосферное давление, МПа.

Связь между  $\alpha_M$  и  $C_{M,P}$  при условии постоянства температуры удовлетворительно описывается изотермой сорбции Лэнгмюра [9]

$$\alpha_M = \frac{a_{M0} b_M P_P}{1 + b_M P_P} = \frac{a_{M0} b_M R_M T C_{M,P}}{n_3 + b_M R_M T C_{M,P}}, \quad (8)$$

где  $\alpha_M$  и  $b_M$  – константы уравнения Лэнгмюра, имеющие размерности соответственно г/см<sup>3</sup> и МПа<sup>-1</sup>;  $P_P$  – равновесное давление метана, МПа.

Скорость сорбции кислорода определяется скоростью его потока и

реагирующей поверхности, поэтому диффузию и сорбцию кислорода также можно считать единым процессом. Скорость сорбции кислорода углём пропорциональна его концентрации в газовой смеси:

$$\frac{\partial a_0}{\partial t} = \rho_{O_{н.у}} \rho_y \alpha_0 \frac{C_0}{C} [1 + \eta(T - T_0)], \quad (9)$$

где  $a_0$  – концентрация сорбированного кислорода, г/см<sup>3</sup>;  $\alpha_0$  – константа скорости сорбции, мл/г·час;  $\rho_{O_{н.у}}$  – плотность кислорода при нормальных условиях, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_y$  – плотность угля, г/см<sup>3</sup>;  $\eta$  – температурный коэффициент скорости сорбции, 1/град;  $T_0$  – начальная температура угольного пласта, °К.

Функции  $W_M$  и  $W_0$  в формулах (1) – (3) представляют собой левые части уравнений:

$$W_M = \frac{\partial C_M}{\partial t},$$

$$W_0 = \frac{\partial C_0}{\partial t}. \quad (10)$$

Принимая допущение о равенстве температур угля и метано-воздушной смеси в каждой точке, уравнение теплопроводности можно записать в следующем виде:

$$\rho_y \beta_y \frac{\partial T}{\partial t} = -\beta \frac{C}{n_3} V \frac{\partial T}{\partial x} + \psi \frac{\partial a_0}{\partial t} + \frac{2\lambda_{ср}(\Theta - T)}{\left(H_{II} + \frac{m}{2}\right)^2} \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность метано-воздушной смеси, г/см<sup>3</sup>;  $\beta, \beta_y$  – удельные теплоемкости угля и метано-воздушной смеси, Дж/кг·град;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды, Дж/м·с·град;  $V$  – скорость движения газового потока, см/с.

Скорость движения метано-воздушной смеси в каждой точке определяется в соответствии с законом Дарси:

$$V = -\frac{K}{\mu n_3^2} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{KTR}{\mu n_3^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (12)$$

При определении краевых условий будем предполагать, что нагнетание воздуха производится с постоянным давлением, в начальный момент времени концентрация воздуха в пласте равна нулю.

С учетом сделанных допущений математическая формулировка задачи напорной фильтрации воздуха в угольном пласте при пневматической обработке представляет собой следующую нелинейную систему дифференциальных и алгебраических уравнений и краевых условий:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{kT}{n_3^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{C}{\mu} \frac{\partial(CR)}{\partial x} \right] - \frac{\partial a_M}{\partial t} - \frac{\partial a_0}{\partial t}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial t} = \frac{kT}{n_3^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{C_M}{\mu} \frac{\partial(CR)}{\partial x} \right] - \frac{\partial a_M}{\partial t};$$

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = \frac{kT}{n_3^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{C_O}{\mu} \frac{\partial(CR)}{\partial x} \right] - \frac{\partial a_O}{\partial t};$$

$$\mu = \frac{\delta_M \mu_M \sqrt{M_M T_{KP.M}} + \delta_6 \mu_6 \sqrt{M_6 T_{KP.B}}}{\delta_M \sqrt{M_M T_{KP.M}} + \delta_6 \sqrt{M_6 T_{KP.B}}};$$

$$R = \frac{R_{yH.}}{\delta_M M_M + \delta_6 M_6};$$

$$\delta_M = \frac{C_M \rho_{B.H.Y.}}{C_M \rho_{B.H.Y.} + (C - C_M) \rho_{B.H.Y.}};$$

$$\delta_6 = 1 - \delta_M;$$

$$\frac{\partial a_M}{\partial t} = \alpha_M (C_M - C_{M.P});$$

$$\alpha_M = 0,9 \cdot 10^2 \frac{n_3}{CRT} \alpha_M^0;$$

$$C_{M.P} = \frac{a_M n_3}{B_M R_M T (a_{M_0} - a_M)}$$

$$\frac{\partial a_0}{\partial t} = \rho_{O_{H.Y.}} \rho_y \alpha_O \frac{C_O}{C} [1 + \eta(T - T_0)];$$

$$\alpha_O = \alpha_{O_{HCX}} e^{-120 a_0};$$

$$\rho_y \beta_y \frac{\partial T}{\partial t} = -\beta \frac{C}{n_3} V \frac{\partial T}{\partial x} + \psi \frac{\partial a_0}{\partial t} + \frac{2\lambda_{CP}(\Theta - T)}{\left(H_{II} + \frac{m}{2}\right)^2};$$

$$\lambda_{CP} = \frac{2\lambda_y \lambda_{II} \left(\frac{m}{2} + H_{II}\right)}{m\lambda_{II} + 2H_{II} \lambda_y};$$

$$\Theta = T_0 + 3[1 - e^{-0,15\Delta T}];$$

$$V = -\frac{KTR}{\mu n_3^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Начальные условия:

$$C(x,0) = C_M(x,0) = C_{M.HCX}; \quad (14)$$

$$a_M(x,0) = a_{M.HCX};$$

$$C_O(x,0) = a_O(x,0) = 0;$$

$$T(x,0) = T_0.$$

Граничные условия:

$$C(0,t) = \frac{P_H n_3}{RT}; \quad (15)$$

$$C_O(0,t) = 0,23 \frac{P_H n_3}{RT};$$

$$C_M(0,t) = 0;$$

$$C(L_{M.C},t) = \frac{P_{amm} n_3}{RT},$$

где  $C_{M.HCX}$  и  $a_{M.HCX}$  – концентрации свободного и сорбированного метана в необработанном массиве, соответственно;  $P_H$  – давление нагнетания воздуха;  $L_{M.C}$  – расстояние между нагнетательной и отточной скважинами, м.

Ввиду сложности полученной системы решить её аналитически не представляется возможным. Поэтому в качестве решения выбран универсальный конечно-разностный метод [10]. Поскольку первые три уравнения системы (13) являются нелинейными, решение соответствующих разностных уравнений на каждом временном шаге может быть получено с использованием итераций.

Решение краевой задачи (13) - (15) позволит получить следующий комплекс характеристик физико-химических процессов, происходящих при нагнетании воздуха в неувлажнённый угольный пласт:

- распределение в пространстве и времени концентрации метано-воздушной смеси,
- метана и кислорода в фильтрационном объёме,
- концентрации сорбированных метана и кислорода,
- газоносность пласта и химическую активность угля в обработанной зоне,
- изменение температуры угольного пласта от нагнетательной скважины к отточной скважине и во времени.

Поскольку проведенные к настоящему времени исследования пневматической обработки не позволяют в достаточной степени оценить её эффективность по борьбе с метаном в угольных шахтах, а также разработать технологию и параметры данного способа, моделирование ставит перед собой следующие задачи:

- исследование основных закономерностей процессов, происходящих при нагнетании воздуха в угольный пласт;
- оценка эффективности и целесообразности применения пневматической обработки для снижения газоносности пласта и одновременно химической активности угля.

Критерием эффективности процесса пневматической обработки является, во-первых, степень снижения газоносности пласта по сравнению с дегазацией скважинами за одинаковое время при расчёте дегазации на аналогичной математической модели [6, 11], во-

вторых, время, требуемое для снижения показателя химической активности угля до величины, соответствующей категории пластов, малоопасных по самовозгоранию ( $\alpha_0 < 0,015$  мл/г·час).

Из системы уравнений (13), определяющей математическую модель пневматической обработки неувлажненного угольного пласта, видно, что на конечный результат воздействия оказывает влияние большое количество различных параметров, характеризующих свойства угольного пласта, вмещающих пород и газов, входящих в состав метано-воздушной смеси.

### Выводы

Детальный анализ пневматической обработки неувлажненного угольного пласта позволяет сформулировать рекомендации по технологии, расчёту параметров и области применения способа.

Наиболее эффективным и экономичным является циклический режим пневматической обработки угольного пласта через длинные скважины, параллельные линии очистного забоя. Чётные скважины являются нагнетательными, нечётные – отточными. Промежутки времени между циклами нагнетания соответствует восстановлению концентрации метана в отточной скважине до максимального значения.

Общее время пневматической обработки по фактору снижения газоносности определяются моментом, когда нагнетание воздуха перестаёт существенно влиять на вынос метана (когда продолжительность циклов нагнетания по вышеприведенному условию становится практически равной нулю).

Пневматическую обработку рекомендуется применять как способ снижения газовыделения и опасности самовозгорания на тонких пластах с коэффициентом проницаемости не ниже  $0,01 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ , разрабатываемых по столбовой системе, при условии, что ожидаемые значения снижения газоносности и времени воздействия по фактору уменьшения химической активности угля являются приемлемыми. Возможно применение пневматической обработки на пластах средней мощности при условии, что будет обеспечен достаточно полный вынос метано-воздушной смеси в отточные скважины [12].

В результате выполненных исследований обоснованы принципы построения математической модели фильтрации метано-воздушной смеси при пневматической обработке неувлажненного угольного пласта, представляющей собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений и краевых условий.

Решение системы уравнений осуществляется численно, с использованием метода конечных разностей. Поставлены задачи моделирования, решение которых позволит установить требуемые характеристики процессов, происходящих при пневматической обработке и разработать технологию и способ расчёта параметров воздействия.

### Литература

1. Мельник, В. В. Прогрессивные технологические решения по комплексному освоению ресурсного потенциала угольных месторождений / В. В. Мельник, В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин. – Донецк : ВИК, 2015. – 340 с.
2. Мельник, В. В. Основные направления повышения технологического уровня и экологичности горного производства при подземной добыче угля с закладкой выработанных пространств шахт: монография // В. В. Мельник, В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин ; под общ. ред. С. С. Гребенкина, В. В. Мельника. - Донецк : ВИК, 2015. – 273 с.
3. Павлыш, В. Н. Перспективы развития теории и технологии комплексного гидropневматического воздействия на угольный пласт / В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин, В. В. Стеблин. // Проблемы горного дела и экологии горного производства: Материалы VIII международной научно-практической конференции (25 - 26 апреля 2013 г., г. Антрацит). – Донецк : Світ книги, 2013. – С.25-29.
4. Павлыш, В. Н. Задача управления процессом пневмодинамического воздействия на газосодержащие массивы / В. Н. Павлыш, Аль-Джерди Орва // Вісті Донецького гірничого інституту, 2012. - № 1(30)-2(31)2012. – С. 29-34.
5. Павлыш, В. Н. Автоматизация управления процессом комплексного гидropневматического воздействия на угольный пласт / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная // Вісті Донецького гірничого інституту, 2014. - №1(34)-№2(35) – С. 405-409.
6. Павлыш, В. Н. Постановка задачи управления процессом пневматического воздействия на угольный пласт / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXI Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе, 15–20 сент. 2014 г. – Донецк : МСМ, 2014. – С. 193-198.
7. Павлыш, В. Н. Математическое моделирование процесса движения газовой смеси в сплошной среде (на примере угольного пласта) / В. Н. Павлыш, И. В. Тарабаева // Проблемы искусственного интеллекта, 2018. - № 3(10). – С. 104-112.
8. Павлыш, В.Н. Применение математического моделирования к исследованию

параметров динамических процессов / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная, Е. В. Перинская // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров : сб. тр. VII Международной научно-методической конференции в городе Сусс (Тунис) с 08 по 17 октября 2013 г. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – С. 184-187.

9. Математические модели и вычислительные методы в теории и практике проектирования систем угольных шахт: монография / С. С. Гребёнкин, В. В. Мельник, В. Н. Павлыш и др. ; под ред. В. Н. Павлыша, С. С. Гребёнкина. – Луганск : Ноулидж, 2017. – 291 с.

10. Гребенникова, И. В. Уравнения математической физики : учебное пособие /

И. В. Гребенникова. - Екатеринбург: УрФУ, 2016. - 164 с.

11. Павлыш, В. Н. Расчет параметров процесса пневмообработки неувлажненного угольного пласта / В. Н. Павлыш, А. С. Гребенкина // Качество минерального сырья: сб. научн. тр. – Кривой Рог, 2011. – С. 445-448.

12. Геоэкологические и экономико-математические аспекты обеспечения безопасных технологий угольных комплексов: монография / С. С. Гребёнкин, В. Н. Павлыш, В. Д. Рябичев и др. ; под общ. ред. С. С. Гребёнкина, В. Н. Павлыша. – Луганск : Ноулидж, 2016. – 340 с.

*Лазебная Л. А. Математическое моделирование и анализ параметров процесса пневматической обработки угольного пласта. Предварительная обработка угольных пластов жидкостями и газами является одним из основных средств решения проблемы борьбы с опасными явлениями в шахтах. Пневматическая обработка неувлажненного угольного пласта направлена на интенсификацию дегазации пласта и окислительную дезактивацию угля в массиве. В данной статье рассматривается задача формирования математической модели процесса движения газозооной смеси в угольном пласте. Основу математической модели составляет краевая задача для системы уравнений, описывающих процесс принудительной фильтрации компонентов газообразной смеси в анизотропной сплошной среде.*

**Ключевые слова:** математическая модель, процесс, уравнение, параметр, структура.

*Lazebnaya L. A. Mathematical modeling and analysis of the parameters of the process of pneumatic treatment of a coal seam. Pretreatment of coal seams with liquids and gases is one of the main means of solving the problem of dealing with hazardous phenomena in mines. Pneumatic treatment of an unmoistened coal seam is aimed at intensifying the degassing of the seam and oxidative deactivation of coal in the array. This article discusses the problem of forming a mathematical model of the process of movement of a gas-air mixture in a coal seam. The basis of the mathematical model is a boundary value problem for a system of equations describing the process of forced filtration of components of a gaseous mixture in an anisotropic continuous medium.*

**Keywords:** mathematical model, process, equation, parameter, structure.

Статья поступила в редакцию 10.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

## Натурная модель вентиляционной сети шахты для реализации системы автоматизированного управления технологическим процессом проветривания шахты

С. В. Неежмаков, А. Е. Ткаченко, Г. Ю. Немов  
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

e-mail: [serg\\_n@list.ru](mailto:serg_n@list.ru), [anica@mail.ru](mailto:anica@mail.ru), [nemovyura@gmail.com](mailto:nemovyura@gmail.com)

### Аннотация

*В процессе проведения горных работ непрерывно изменяется протяженность выработок и их аэродинамическое сопротивление, что ведет к отклонению фактического расхода воздуха от требуемого. Следовательно, необходимо разработать автоматизированную систему управления технологическим процессом проветривания шахты, в которой необходимо учитывать факт влияния величины аэродинамического сопротивления одного канала на аналогичную величину смежных каналов. Математически это явление описать довольно сложно, поэтому была создана натурная модель, на которой отчетливо прослеживается данная зависимость.*

### Введение

Создание комфортных условий при ведении работ в подземных выработках шахт или рудников зависит от работы системы проветривания, которая включает в себя вентиляционную сеть, вентиляторную установку главного проветривания, калориферные установки, вентиляторы местного проветривания, а также средства контроля состояния рудничной атмосферы.

В настоящее время под автоматизацией вентиляторных установок понимают дистанционное управление вентиляторами и устройствами реверсирования струи воздуха, а также осуществление контроля работы установки. Аппаратура автоматизации должна выполнять следующие основные функции: регулирование производительности вентиляторов; автоматическое включение резервного вентилятора при отключении рабочего; повторный пуск при восстановлении исчезнувшего питающего напряжения; реверс вентиляционной струи [1].

Прогресс современной горнодобывающей и угольной промышленности выдвигает ряд новых требований к вентиляционным системам шахт и рудников. Интенсификация технологических процессов подземной добычи полезных ископаемых и увеличение скорости продвижения очистных забоев вызывают повышенный приток вредных выделений в рудничную атмосферу, более стремительное изменение структуры вентиляционной сети и, соответственно, аэродинамического сопротивления горных выработок. Проведение добычных работ на все больших глубинах также

приводит к увеличению выделения газов и ухудшению климатических условий за счет увеличения отдачи тепла в атмосферу горных выработок от окружающих пород [2].

### Постановка задачи

Процесс проветривания шахты строго регламентируется «Правилами безопасности в угольных шахтах» (ПБ) [3] и другими нормативными документами. В нормальном режиме система проветривания должна осуществлять подачу и распределение по выработкам такого количества воздуха, которое в соответствии с ПБ требуется для обеспечения комфортных и безопасных условий труда горнорабочих, обеспечения заданной производительности забоев при существующих параметрах рудничной атмосферы: газовыделении, пылеобразовании, выделении тепла и влажности, при оптимальных режимах работы вентиляторных установок.

В процессе проведения горных работ непрерывно изменяется протяженность горных выработок, а вместе с ней и их аэродинамическое сопротивление. Это приводит к тому, что происходит отклонение фактического расхода воздуха от требуемого в большую или меньшую сторону, что недопустимо по правилам безопасности. Следовательно, необходимо разработать автоматизированную систему управления технологическим процессом проветривания горных выработок таким образом, чтобы она осуществляла перераспределение потоков воздуха.

Вопросам регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях рудников

посвящено значительное число работ, среди которых можно выделить труды иностранных и российских исследователей, таких как А. Д. Вассерман, С. П. Алехичев, Г. В. Калабин, Ф. А. Абрамов, В. А. Бойко, А. А. Потемкин, Р. Б. Тянь, С. Цой, А. Д. Багриновский, Е. И. Рогов, С. И. Петрович, С. М. Цхай, М. Н. Бодягин, А. Г. Евдокимов, А. А. Мясников, С. И. Луговской, Г. К. Рязанцев, Е. Г. Давыдов, С. А. Сарац [S. A. Sarac], С. Косциц [Koscic], З. Янг [Z. Y. Yang] с коллегами, Ф.-Б. Жюу [F.-B. Zhou] и др.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие программные продукты по проектированию вентиляционных систем подземных рудников: в России — IRS Вентиляция ПЛА, Аэросеть, Вентиляция 2.0, САПР ВС, Динавент и др., за рубежом — VentSim (Австралия), VnetPC (США), VUMA (ЮАР), РЕВОД (Украина) и др.

Однако перечисленные программы выполняют статический расчет параметров вентиляционной сети, а для проведения наладки системы автоматизации воздухораспределения в вентиляционной сети необходимо динамическая картина изменений аэродинамических сопротивлений, причем, одновременно в нескольких точках.

В монографии [4] был изучен вопрос оптимизации размещения регуляторов в вентиляционных системах рудников с применением комплекса программ САПР ВС (А.Д. Вассерман, В. В. Осинцев) [5].

Проблема перераспределения потоков воздуха была рассмотрена Завадской Т.В. в работе [6].

Выемочные участки являются основными объектами проветривания на угольных шахтах. В зависимости от нагрузки на них необходимо обеспечивать подачу соответствующего количества воздуха.

Поэтому и возникает необходимость в перераспределении потоков воздуха [7,8]. Структурная схема подключения САУ к системе проветривания выемочного участка (СПВУ) показана на рис.1, а структура САУ – на рис.2.



Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной СПВУ

При уменьшении аэродинамического сопротивления  $R'$  начинает работу двигатель, который осуществляет передвижение регулирующего органа, уменьшается угол его установки  $\alpha$ , разница между фактическим и требуемым расходами  $\Delta Q$  растет и расход воздуха  $Q$  в данной ветви увеличивается.

При увеличении  $R'$  двигатель работает в обратном режиме,  $\alpha$  увеличивается, и расход воздуха  $Q$  уменьшается. Такой принцип перераспределения и был взят за основу при разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом проветривания горных выработок.

Однако в работе Завадской Т.В. не учитывается факт влияния величины аэродинамического сопротивления одного канала на аналогичную величину смежных каналов.

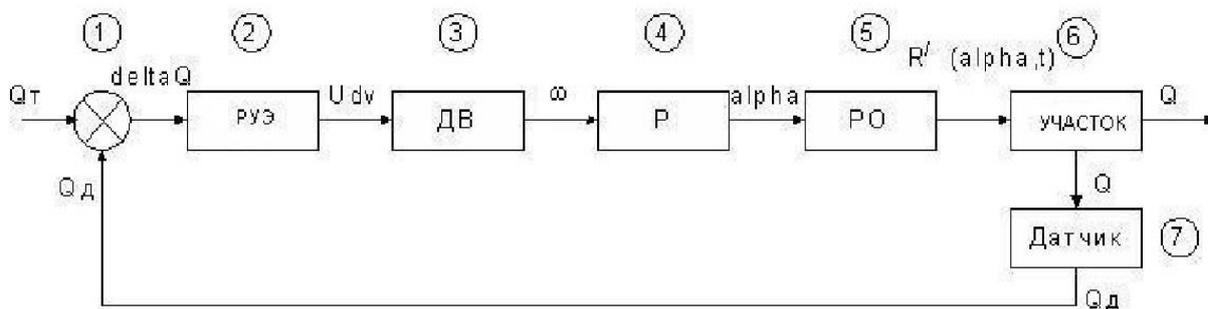


Рисунок 2 – Структура системы управления потоком воздуха в ветви:  
 1 – определитель  $\Delta Q$ ; 2 – релейный усилительный элемент; 3 – двигатель;  
 4 – редуктор; 5 – регулирующая орган; 6 – СПВУ (объект); 7 – датчик [7,11,12]

Круглов Ю. В. и Семин М. А. в работе [9] рассматривают задачу оптимального управления технологическим процессом проветривания горных выработок. Для ряда выработок, приоритетных в плане проветривания, вводим

декларируемый расход  $Q^*$  (уставку) – минимальный расход, обеспечивающий проветривание выработки и удаление из нее вредных газов или пыли. Тогда для достаточного проветривания

рудничного пространства необходимо выполнение неравенств [10]:

$$Q_i > Q_i^*, i \in A, \quad (1)$$

где  $A$  – множество индексов тех выработок, в которых декларируется заданный расход.

Если расход  $Q$  в данной выработке меньше минимально допустимого расхода  $Q^*$ , необходимо увеличить расход воздуха в данной выработке, что можно сделать 2 способами: увеличивая частоту вращения рабочего колеса п вентиляторной установки или изменяя аэродинамическое сопротивление, создаваемое автоматическими вентиляционными дверями (АВД), в соседних выработках, тем самым перераспределяя воздух между различными участками сети.

Задача оптимизации заключается в нахождении таких углов поворота жалюзийных регуляторов АВД и угловой частоты рабочего колеса главной вентиляторной установки (ГВУ), при которых вентилятор развивал бы минимальную мощность  $N$ , при этом не нарушая условий (1).

В работе [9] была сформулирована концепция АВД-связок построения алгоритмов оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей рудников. Была показана необходимость использования данной концепции для построения универсального алгоритма оптимального управления, в равной степени применимого для рудников различных топологий.

На базе сформулированной концепции АВД-связок была построена математическая модель оптимального управления проветриванием рудников. В построенной математической модели совершается оптимизация проветривания по параметрам: углы поворота жалюзийных створок АВД, частота вращения ГВУ и рециркуляционных ВУ.

Тем не менее, остался без рассмотрения вопрос о поэтапном введении регулирующих устройств и системы автоматизации перераспределения воздушных потоков на действующее горное предприятие. Так же проблемным является вопрос о поведении автоматизированной системы при выходе из строя одного из датчиков расхода воздуха, расположенных в выработке.

На текущий момент существует несколько технических решений по автоматизации технологического процесса проветривания горных выработок.

Аппаратура УКАВ-М предназначена для автоматического управления шахтными вентиляторами главного проветривания с различными типами вентиляторных агрегатов и их электроприводов, обеспечивает различные

виды управления и режимы работы, а также контроль, защиту и сигнализацию состояния вентиляторных установок [13].

Аппаратура УКАВ-М выполняет следующие функции:

- выбор вида управления вентиляторной установкой (дистанционное управление из центрального диспетчерского пункта; автоматизированное управление из помещения вентиляторной установки; ремонтно-наладочное);

- автоматический контроль параметров и сигнализацию за работой установки (подача и депрессия вентилятора; температура подшипников вентилятора и электродвигателя; положение лопаток направляющего аппарата; положение ляд; расход и давления масла в системе смазки; разгон двигателя; наличия напряжения питания);

- регулирование производительности вентилятора поворотом лопаток направляющего аппарата (для центробежных вентиляторов);

- автоматическое включение резервного вентилятора при аварийном отключении рабочего вентилятора;

- автоматическое включение резерва низкого напряжения;

- автоматическое повторное включение при кратковременном (до 10 с) отключении питающего напряжения;

- возможность реверсирования вентиляционной струи без остановки центробежного вентилятора при подключении к комплекту УКАВ-М аппаратуры автоматического реверса;

- возможность регулирования производительности вентилятора за счет изменения скорости вращения приводного двигателя при подключении к комплекту УКАВ-М аппаратуры регулирования частоты вращения вентилятора с помощью машины двойного питания или асинхронно-вентильного каскада.

Система автоматизированного управления и контроля вентиляторами главного проветривания МС КУБ-ГВУ [14]. предназначена для контроля и управления основным и вспомогательным оборудованием и режимами главной вентиляторной установки (ГВУ), состоящей из двух вентиляционных агрегатов (основного и резервного). ГВУ может функционировать в блоке с калориферной установкой, выполняющей подогрев воздуха, подаваемого в шахту, либо без нее. К основному оборудованию вентагрегата относятся электродвигатель, рабочее колесо вентилятора и механизм поворота на ходу лопаток рабочего колеса. К вспомогательным механизмам вентагрегата относятся тормозное устройство (ТУ), система управления воздушным потоком (перекидная и отсечная ляды, флажковая дверь),

система циркуляционной смазки (СЦС) подшипников венгагрегатов и т.д.

Однако существующие системы автоматизации технологического процесса проветривания горных выработок не обеспечивают функцию перераспределения потоков воздуха в смежных выработках, что влечет за собой не только опасность загазованности отдельной выработки и запыления другой, но и обуславливает повышенное потребление электроэнергии вентиляторной установкой главного проветривания.

### Цели и задачи научного исследования

С целью решения задачи построения системы автоматизации воздухораспределения в вентиляционной сети и создания алгоритма ее работы необходимо изучить динамику изменений аэродинамических сопротивлений при различных возмущающих и управляющих воздействиях, исследовать поведение системы при одновременном воздействии нескольких факторов в различных пространственных точках вентиляционной сети.

Натурная модель вентиляционной сети шахты позволяет провести необходимые исследования за относительно короткое время, тогда как создание и расчет математической модели, учитывающей взаимосвязь аэродинамического сопротивления нескольких точек вентиляционной сети, представляет собой более длительный и трудозатратный процесс.

На рисунке 3 приведена технологическая схема разработанной натурной модели. Вентилятор 1 создает направленный поток воздуха, забираемый из атмосферы через входной патрубок 14, который распределяется по трем параллельным ветвям.

Датчики скорости 2,5,8,11 осуществляют измерение скорости потока на входе в

вентиляционную сеть и в параллельных ветвях соответственно. Заслоны 3,6,9,12 предназначены для изменения сопротивления вентиляционной сети и являются источником возмущающего воздействия. Установку требуемого сопротивления сети осуществляет программируемый логический контроллер ПЛК150-220 посредством воздействия на управляемые заслоны 4,7,10,13.

Степень закрытия заслонов определяется резистивными датчиками положения 15-22. Давление воздуха измеряют преобразователи давления ПД150-ДИВ200П установленные на входе в вентиляционную сеть 23, в месте пересечения параллельных ветвей 24, 25 и на выходе из сети 26.

В результате проведенных опытов были получены графики переходных процессов изменения расхода воздуха в каждой параллельной ветви вентиляционной сети (рис. 4-6) и в общем канале (рис. 7) в зависимости от величины аэродинамического сопротивления, зависящего от положения заслонов возмущающего воздействия.

На представленных графиках прослеживается факт влияния величины аэродинамического сопротивления одного канала на аналогичную величину смежных каналов.

В период времени от 0 до  $t_1$  расход воздуха по апериодическому закону увеличивается до установившегося значения во всех каналах.

В момент времени  $t_1$  было произведено увеличение сопротивления в первом канале путем воздействия на возмущающий заслон. Спустя 3 секунды расход воздуха в каждом канале начал изменять свое значение: в первом и общем канале его значение уменьшилось, а во втором и третьем – увеличилось.

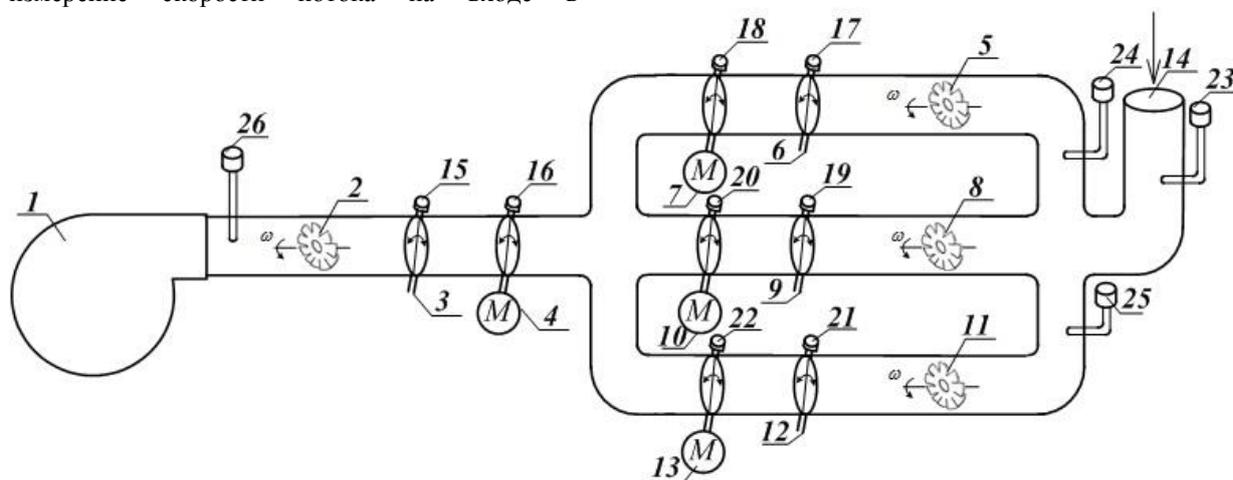


Рисунок 3 – Технологическая схема натурной модели вентиляционной сети

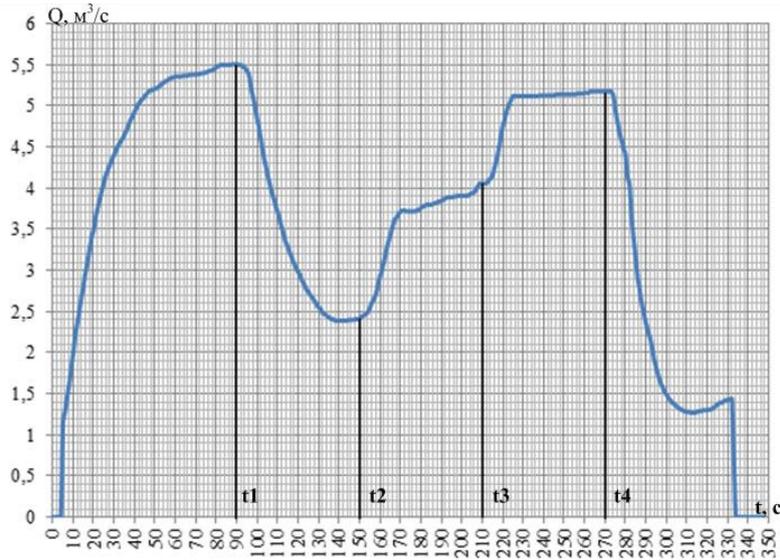


Рисунок 4 – График переходного процесса изменения расхода воздуха в 1-м канале

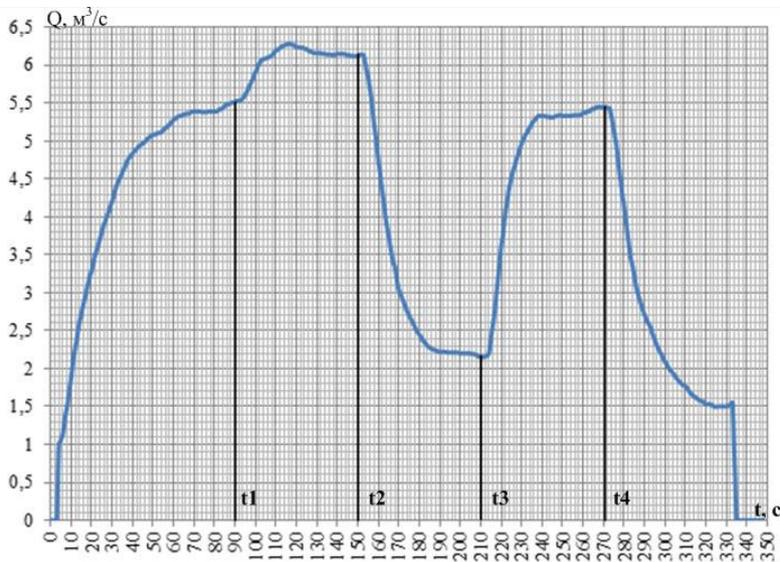


Рисунок 5 – График переходного процесса изменения расхода воздуха во 2-м канале

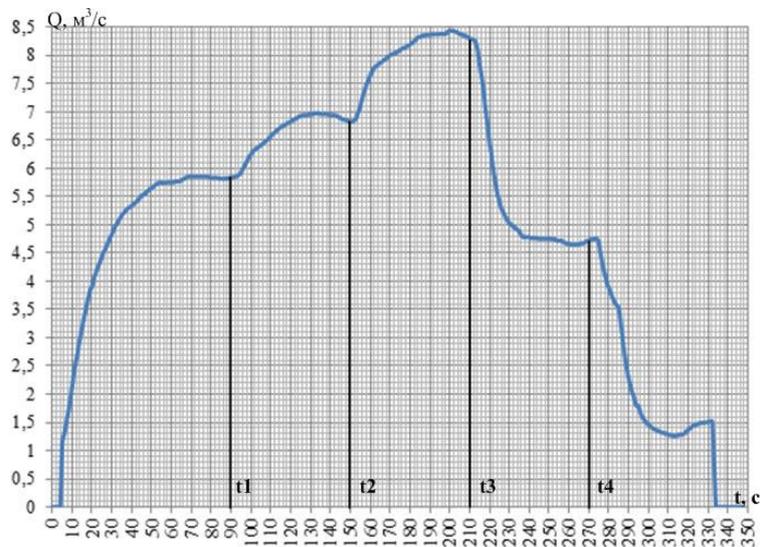


Рисунок 6 – График переходного процесса изменения расхода воздуха в 3-м канале

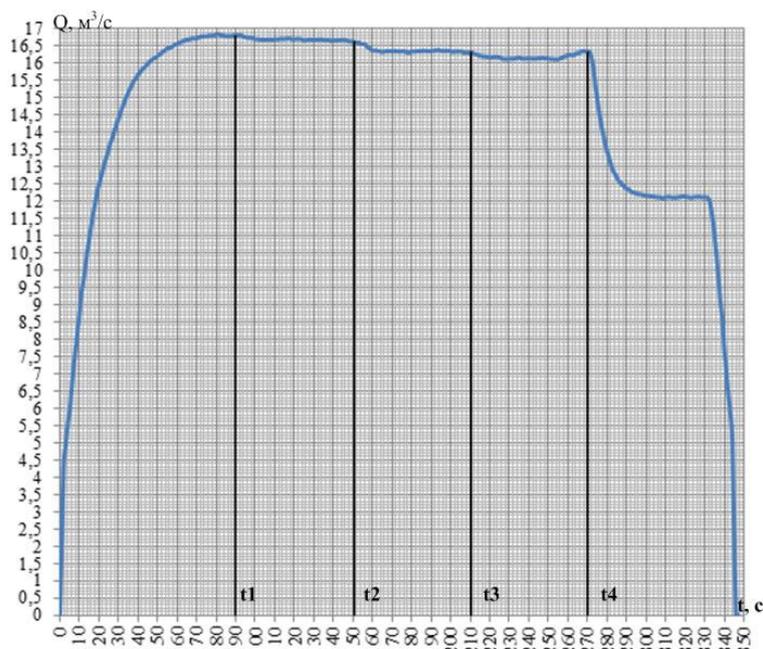


Рисунок 7 – График переходного процесса изменения расхода воздуха в общем канале

В момент времени  $t_2$  было произведено увеличение сопротивления во втором канале путем воздействия на возмущающий заслон. Спустя 3 секунды расход воздуха во втором и общем канале уменьшился, а в первом и третьем – увеличился.

В момент времени  $t_3$  было произведено увеличение сопротивления в третьем канале путем воздействия на возмущающий заслон. Спустя 3 секунды расход воздуха в третьем и общем канале уменьшился, а в первом и втором – увеличился.

В момент времени  $t_4$  было произведено увеличение сопротивления во общем канале путем воздействия на возмущающий заслон. Спустя 3 секунды расход воздуха во всех каналах уменьшился.

Значения расхода в общем канале после увеличения сопротивления в отдельных каналах уменьшается, но незначительно. Это объясняется подсосом воздуха в местах установки заслонов.

Движение воздуха в каждой регулируемой ветви описывается уравнением:

$$K \frac{Q}{dt} + (R + R')Q^2(t) = H(t - \tau), \quad (2)$$

где  $Q(t)$  - расход воздуха;  
 $k$  - коэффициент инерционности воздушного потока,  
 $H$  - депрессия;  
 $R$ - аэродинамическое сопротивление, с учетом утечек через выработанное пространство;  
 $R'$ - регулируемое сопротивление;  
 $\tau$  - запаздывание по передаче воздуха от канала к концу участка[15].

Если применить к уравнению 1 преобразование Лапласа, то получим передаточную функцию ветви  $W(p)$  выраженную аperiodическим звеном с запаздыванием:

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{Tp + 1}, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент передачи ветви, который представляет собой отношение действительного значения расхода воздуха в сети к требуемому,

$\tau$  — время чистого запаздывания в канале управления;

$T$  — постоянная времени.

### Выводы

Созданная модель позволяет проводить исследование процессов воздухораспределения в шахтных вентиляционных сетях при одновременном изменении значений аэродинамического сопротивления в нескольких точках системы, а также смоделировать ситуацию с выходом из строя одного из датчиков расхода воздуха и разработать дальнейший план действий по управлению технологическим процессом проветривания горных выработок.

Полученные при экспериментах на модели результаты позволяют разработать систему автоматизированного управления технологическим процессом проветривания горных выработок с учетом взаимного влияния аэродинамического сопротивления смежных ветвей.

Такая система позволит избежать таких внештатных ситуаций как недостаток свежего воздуха в одной выработке и образование пылевого облака в другой, вследствие критически малого значения расхода воздуха в первой и превышения скорости движения воздушного потока во второй выработке, соответственно.

### Литература

1. Батицкий, В. А. Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в горной промышленности / В. А. Батицкий, В. И. Куроедов, А. А. Рыжков. – Москва : Недра 1991. – 303 с.
2. Толпежников, Л. И. Автоматическое управление процессами шахт и рудников / Л. И. Толпежников. – М.: Недра, 1985. – 352 с.
3. Правила безопасности в угольных шахтах [Электронный ресурс] : утв. приказом Гос. Комитета горного и тех. надзора ДНР и Мин-вом угля и энергетики ДНР 18.04.2016 г. № 36/208 : ввод в действие 17.05.2016. – Донецк, 2016. – Режим доступа: [http://mintek-dnr.ru/zue/pravila\\_bezопасnosti\\_na\\_ugolnykh\\_shakh\\_takh.pdf](http://mintek-dnr.ru/zue/pravila_bezопасnosti_na_ugolnykh_shakh_takh.pdf) – Загл. с экрана
4. Козырев, С. А. Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов / С. А. Козырев, А. В. Осинцева, П. В. Амосов. — Апатиты: КНЦ РАН, 2019. — 114 с.: ил
5. Хохолов, Ю. А. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера / Ю. А. Хохолов, Д. Е. Соловьев; отв. ред. А. С. Курилко; Рос. акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т горного дела Севера им. Н. В. Черского. Новосибирск: Гео, 2013. - 185 с.
6. Завадская, Т. В. Блочно-ориентированная модель системы многосвязного управления воздухораспределением в шахтной вентиляционной сети / Т. В. Завадская // Зб. наук. пр. Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вип. 7(150) – 290 с. (сер.: «Проблеми моделювання та автоматизації проектування»)
7. Абрамов, Ф. А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф. А. Абрамов, Л. П. Фельдман, В. А. Святный – Киев: Наук. думка, 1981.
8. Абрамов, Ф. А. Автоматизация проветривания шахт / Ф. А. Абрамов, В. А. Бойко – Киев: Наук. думка, 1967.
9. Круглов, Ю. В. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии / Ю. В. Круглов, М. А. Семин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2013. - № 9.
10. Круглов, Ю. В. Научно-технические основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Ю. В. Круглов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодн. науч. сессии Горн. ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2010 г. – Пермь, 2011. – С. 100–102.
11. Святный, В. А. Моделирование аэрогазодинамических процессов и разработка систем управления проветриванием угольных шахт: дис. на соискание науч. степени док. техн. наук: 05.13.07 / В. А. Святный. – Донецк, 1985. – 440 с.
12. Теория автоматического управления / Л. С. Гольдфарб [и др.] – Москва: Высшая школа, 1968.
13. Вентиляция шахт и рудников: учеб. пособие / В. И. Голинько, Я. Я. Лебедев, О. А. Муха. – Д.: Национальный горный университет, 2012. – 266 с.
14. ООО научно-производственная фирма “Электроника контроля, управления, безопасности” [Электронный ресурс] : офиц. сайт. - Электрон. дан. – Новосибирск, [2019]. - Режим доступа : <http://elcub.ru>
15. Сальман, С. А. Разработка и моделирование систем управления воздухораспределением в шахтных вентиляционных сетях [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд тех. наук по специальности 05.13.07 -"Автоматизация технологических процессов" / С. А. Сальман. – Донецк: Донецкий государственный технический университет, 1999. – 21 с.

*Неежмаков С. В., Ткаченко А. Е., Немов Г. Ю. Натурная модель вентиляционной сети шахты для реализации системы автоматизированного управления технологическим процессом проветривания шахты. В процессе проведения горных работ непрерывно изменяется протяженность выработок и их аэродинамическое сопротивление, что ведет к отклонению фактического расхода воздуха от требуемого. Следовательно, необходимо разработать автоматизированную систему управления технологическим процессом проветривания шахты, в которой необходимо учитывать факт влияния величины аэродинамического сопротивления одного канала на аналогичную величину смежных*

каналов. Математически это явление описать довольно сложно, поэтому была создана натурная модель, на которой отчетливо прослеживается данная зависимость.

**Ключевые слова:** вентиляционная сеть, аэродинамическое сопротивление, распределение воздушных потоков, натурная модель, система автоматизированного управления.

**Neezhmakov S., Tkachenko A, Nemov G. Full-scale model of the mine ventilation network for the implementation of the automated control system for the technological process of mine ventilation.** In the course of mining operations, the length of the workings and their aerodynamic resistance are continuously changing, which leads to a deviation of the actual air flow rate from the required one. Therefore, it is necessary to develop an automated control system for the technological process of ventilation of the mine, in which it is necessary to take into account the fact of the influence of the value of the aerodynamic resistance of one channel on the similar value of the adjacent channels. It is rather difficult to describe this phenomenon mathematically, therefore, a full-scale model was created, on which this dependence can be clearly traced.

**Keywords:** ventilation network, aerodynamic resistance, air flow distribution, full-scale model, automated control system.

Статья поступила в редакцию 10.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

УДК 51-7:004.92:519.6

## Математическое моделирование и автоматизация управления процессом динамического воздействия на многокомпонентные массы

Е. В. Перинская

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

e-mail: [elenaperinskaya@mail.ru](mailto:elenaperinskaya@mail.ru)

### Аннотация

*В данной статье рассматривается задача разработки методов повышения эффективности процесса динамического перемешивания неоднородной массы в аппаратах конвективного типа. Модернизация геометрических параметров проводится на основании результатов математического моделирования процесса и являются стационарными характеристиками. Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объеме аппарата. В качестве одного из вариантов решения задачи предлагается разработать систему автоматизированного управления процессом. Теоретической базой системы является комплекс математических моделей и параметров оборудования.*

### Актуальность работы

Технология производства многих материалов промышленного назначения включает как базовый этап процесс конвективной обработки многокомпонентных смесей. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов. Основным методом исследования процессов является математическое моделирование с использованием детерминированных моделей.

### Цель работы

Формирование пакета математических моделей, обоснование структуры и параметров системы автоматизированного управления процессом функционирования аппаратов конвективного типа.

### Основное содержание работы.

Исследованиями установлено, что основное влияние на процесс конвективного перемешивания многокомпонентных материалов оказывают геометрические параметры (координаты установки элемента вращения, координаты расположения входных трубопроводов для поступающих компонентов) и технологические (скорость вращения конвективного элемента и его позиционирование).

Выбор критериев оценки повышения

эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объеме аппарата.

Модернизация геометрических параметров проводится на основании результатов математического моделирования процесса и являются стационарными характеристиками.

Динамической характеристикой являются технологические параметры – скорость вращения лопасти и её положение, следовательно, управляя этими параметрами, можно влиять на качество процесса согласно разработанным критериям. Для реализации методов повышения эффективности процесса и качества продукции предлагается разработать систему автоматизированного управления процессом.

Равномерность обработки достаточно полно определяется наличием зон II, III и степенью преобладания площади зоны I в проектной области воздействия. В связи с этим для оценки качества обработки выбраны:

$\nu$  - коэффициент относительной величины зон низкой активности:

$$\nu = \frac{S_H}{S_{PP}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где  $S_H$  – площадь зон II, III (зоны низкой активности);

$S_{PP}$  – площадь проектной зоны воздействия.

Коэффициент вариации относительного прироста концентрации прореагировавших компонентов, определяемого по величине концентрации в каждой точке:

$$V_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta C_i - \Delta \bar{C})^2}}{\Delta \bar{C}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

где  $\Delta C_i$  и  $\Delta \bar{C}$  – значения прироста концентрации соответственно в  $i$ -й точке и среднее по обрабатываемой зоне,

$$\Delta C_i = \frac{\Delta C_{расч i}}{\Delta C_{max}} \quad (3)$$

где  $\Delta C_{расч i}$  – прирост концентрации в  $i$ -й точке по результатам моделирования;

$\Delta C_{max}$  – максимальный прирост концентрации.

Для оценки эффективности воздействия в зависимости от модификации параметров будем пользоваться величинами, определяющими:

а) относительное уменьшение площади зон низкой активности

$$\mathcal{E}_s = \frac{S_{H.O} - S_{H.K}}{S_{H.O}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

где  $S_{H.O}$  и  $S_{H.K}$  – площади зон низкой активности соответственно при начальном значении параметра и конечном (модифицированном) значении;

б) уменьшение коэффициента вариации относительного прироста:

$$\mathcal{E}_v = \frac{V_R^0}{V_R^k} \quad (5)$$

где  $V_R^0, V_R^k$  – коэффициенты вариации соответственно для начального и конечного (модифицированного) значения параметра.

Считаем, что стационарные параметры определены по результатам компьютерных исследований на основании разработанных математических моделей и программ, а процессом управляет система путём контроля и при необходимости коррекции динамических параметров (скорость вращения конвективного элемента и его положение). При этом в процессе работы оборудования проводится постоянный контроль качества и эффективности на основании критериев (1) – (5).

В основу математической модели положена двумерная краевая задача для двух геометрических переменных  $x$  и  $y$ , концентрация  $C(t,x,y)$  является решением уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = & -V_x \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D_L}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \\ & + V_y \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{D_H}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \\ & + \frac{Q_1(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + Q_2 C_5 - Q C}{V} \quad (6) \end{aligned}$$

$$(x, y) \in G, \quad t > 0$$

при следующем граничном и начальном условии:

$$C_x(t,x,y) = 0, \quad (t,x,y) \in \partial G \times [0,1] \quad (7)$$

$$C(0,x,y) = C_0 \quad (8)$$

Краевая задача (6)–(8) описывает двумерный вариант модели аппарата, она содержит две неизвестные функции  $\psi(x, y)$  и  $C(t,x,y)$

Базовая компьютерная программа разработана для численного моделирования гидродинамических процессов при работе однолопастных машин конвективного типа.

Уравнение в безразмерных величинах имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{1}{l \cdot h} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} - \\ & - \frac{1}{l \cdot h} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D_L}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \\ & + \frac{D_H}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + f_1 + f_2 + f_3 \quad (9) \end{aligned}$$

$$0 < x < 1, \quad 0 < y < 1, \quad 0 < t < 1$$

Начальное условие:

$$C(x, y, 0) = C_0 \quad (10)$$

Граничные условия при отсутствии обмена с внешней средой:

$$C_x(0, y, t) = C_x(1, y, t) = 0$$

$$C_y(x, 0, t) = C_y(x, 1, t) = 0 \quad (11)$$

Функции  $f$  имеют вид:

$$f_1 = \begin{cases} 0 & x \neq x_1 \quad y \neq y_1 \\ \frac{Q_1 \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)}{V1} & x = x_1 \quad y = y_1 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & x \neq x_2 \quad y \neq y_2 \\ \frac{Q_2 \cdot C_5}{V1} & x = x_2 \quad y = y_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_3 = \begin{cases} 0 & x \neq x_3 \quad y \neq y_3 \\ -\frac{Q \cdot C}{V1} & x = x_3 \quad y = y_3 \end{cases} \quad (14)$$

Функция тока  $\psi(x,y)$

$$\frac{1}{l^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{1}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \mu(x, y),$$

$$0 < x < 1, \quad 0 < y < 1 \quad (15)$$

$$\mu(x, y) = \begin{cases} \frac{W}{Vl} & x = x_0, \quad y = y_0 \\ \frac{W}{Vl \cdot FN \cdot (l^2(x-x_0)^2 + h^2 \cdot (y-y_0)^2)} & x \neq x_0, \quad y \neq y_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\psi(x,0) = \psi(x,1) = \psi(0, y) = \psi(1, y) = 0 \quad (17)$$

Переменные, указанные в уравнениях, имеют следующий смысл:

$x, y$  – координаты пространства, безразмерные величины;

$t$  – время, с;

$C$  – концентрация твердой фазы в рабочем объеме цилиндра, содержащего суспензию, г/см<sup>3</sup>;

$l$  – максимальный размер по оси X (радиус цилиндра), см;

$H$  – максимальный размер по оси Y (высота цилиндра), см;

$Vl$  – площадь поперечного сечения цилиндра, см;  $D_L, D_H$  – коэффициенты продольной и поперечной диффузии, безразмерные величины;

$f_1, f_2$  – функции, отражающие точечные источники твердой фазы, если они есть, г/(с·см);

$f_3$  – функция, отражающая отток суспензии, г/(с·см);

$C_0$  – начальное распределение концентрации твердой фазы, г/см<sup>3</sup>;

$(x_1, y_1)(x_2, y_2)$  – координаты точечных источников;

$(x_3, y_3)$  – координаты точечного оттока;

$Q_1, Q_2$  – интенсивность источников, см<sup>3</sup>/с;

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – характеристики источников (концентрация), г/см<sup>3</sup>;

$Q$  – интенсивность оттока ( $Q=Q_1+Q_2$ ) см<sup>3</sup>/с;

$C$  – характеристика оттока, г/см;

$T$  – время исследования процесса, с;

$W$  – угловая скорость вращения лопасти, если в рабочем объеме устанавливается устойчиво конвективное перемешивание (при его отсутствии  $W=0$ ), об/с;

$x_0, y_0$  – координаты источника вращения;

$FN$  – вязкость суспензии, безразмерная величина.

На первом этапе считаем, что стационарные параметры определены по результатам компьютерных исследований на основании разработанных математических моделей и программ, а процессом управляет

система путём контроля и при необходимости коррекции динамических параметров (скорость вращения конвективного элемента и его положение). При этом в процессе работы оборудования проводится постоянный контроль качества и эффективности на основании критериев

На следующем этапе разработки системы можно ввести блок вариации стационарных параметров с последующими рекомендациями по их модификации.

Технически поставленную задачу можно решить на основе использования универсальных компьютеров, которыми в настоящее время оснащается каждое предприятие. Преимуществом этого пути является то, что для реализации задачи достаточно разработать специализированный пакет прикладных программ и обеспечить связь управляющей аппаратуры с компьютером. Однако при этом возникает ряд проблем, вызванных характером работы: объекты управления находятся нередко под землей, зачастую на большом удалении, нагнетание производится одновременно на нескольких участках, установки периодически передвигаются, а это требует создания дорогостоящих линий связи, их защиты, обеспечения мобильности. Поэтому на практике более предпочтительным является путь создания специализированного устройства управления, которое работает в непосредственной связи с технологическим оборудованием.

Исследования показали, что наиболее приемлемым в данном случае является применение специализированных устройств на базе микроконтроллера [1, с.135, 113].

Контролируемые параметры: скорость вращения  $\omega(t)$ ,  $t$  – текущее время).

Перед началом процесса задаются исходные данные, устанавливается  $t = 0$ , запускается устройство контроля и управления (УКУ).

Проект системы включает набор специализированных электронных устройств, функционирование которых координируется с помощью программируемого микроконтроллера, и пакета программ. Структура базовой единицы системы приведена на рис.1.

Сигналы с датчиков в виде синусоидального напряжения поступают на вход преобразователей с целью согласования выходного напряжения датчика с уровнем входного напряжения микроконтроллера.

В микроконтроллере реализуется прием, хранение и обработка данных, расчет фактических параметров и их сравнение с паспортными, а также выработка и выдача на регулятор управляющих сигналов, если необходимо корректировать их величину. .

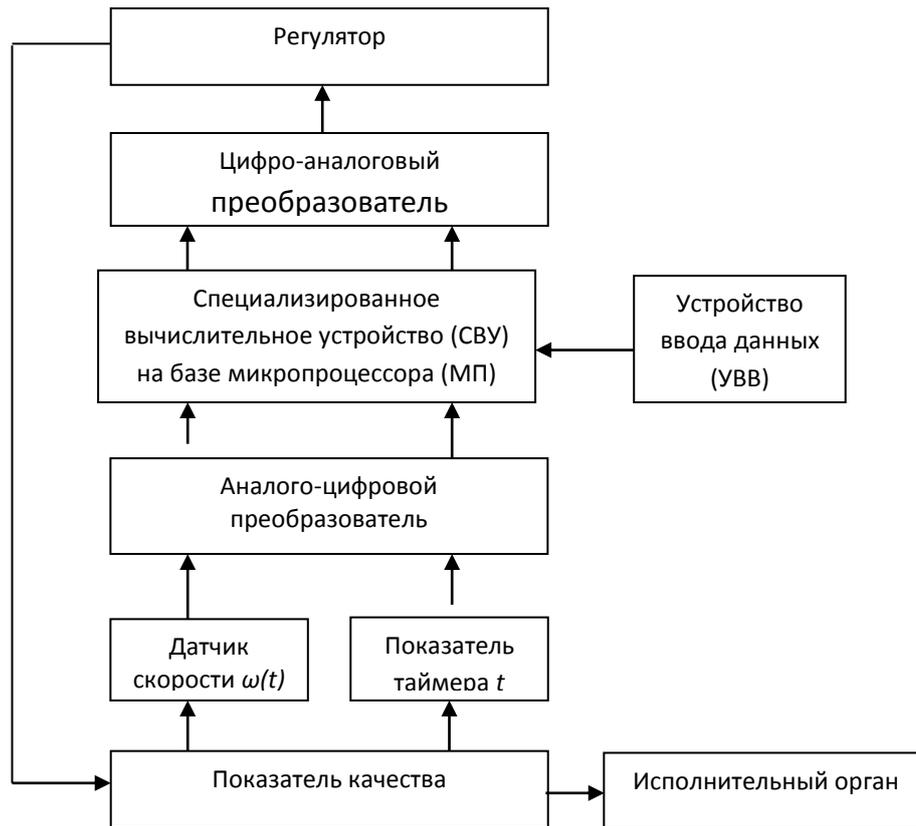


Рисунок 1 – Структура базовой единицы системы автоматизированного контроля и управления процессом

Критерий окончания процесса – достижение заданного показателя качества либо времени воздействия.

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, либо в специализированном исполнении для использования в специальных условиях.

В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств – это компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания и приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.) [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

ПК состоит из четырех основных компонентов: центральный процессор (ЦП), устройство ввода-вывода (УВВ), блок

электропитания (БЭП), память программ (ПП). ЦП представляет собой основной блок ПК, координирующий обработку информации. В нем находится микропроцессорная логика, сканирующая программу и состояние блоков оборудования. УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК. Источники сигналов ввода – датчики, кнопки, клавиатура и др. Адреса вывода – пускатели электродвигателей, контакторы, насосы и т.д. Дополнительно могут применяться специализированные аналоговые модули ввода-вывода (САМВВ). Обобщенная схема ПК приведена на рисунке 2.

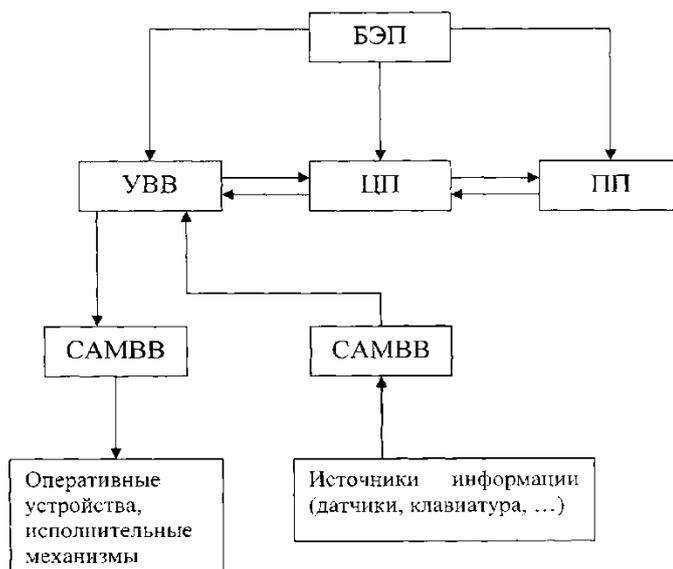


Рисунок 2 – Обобщенная схема программируемого контроллера (ПК)

БЭП преобразует сетевое напряжение в отфильтрованное стабилизированное электропитание ПК, ПП сохраняет программы управления.

Особенностью является то, что память программируется пользователем. ПК программируют по цепной схеме, т.е. на языке, схожем с релейной логикой управления. При внесении изменений в программу к ПК подключают программирующее устройство и соответствующие изменения выполняют без перемонтажа. В течение кванта времени, определяемого частотой устройства управления, производится контроль текущего значения параметров и показателя качества.

Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата. В этой связи важное значение имеют быстродействие автомата и аппаратные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую установку.

### Выводы

Рассмотрена структура и принципы построения системы автоматизированного управления процессом функционирования аппаратов конвективного типа. Комплекс исходных данных, контролируемых, управляемых и управляющих параметров определяется характеристиками объекта и целями воздействия.

Рассмотрена базовая математическая модель процесса, основу которой составляет двумерная краевая задача.

Направлением дальнейшего развития и совершенствования системы является разработка проекта, на основании которого осуществляются все последующие мероприятия, а также выбор и

модификация элементной базы конструирования системы и её подсистем.

### Литература

1. Математическое моделирование процессов обезвоживания обогащенного минерального сырья. Монография / Павлыш В.Н., Назимко Е.И., Тарабаева И.В., Науменко В.Г., Перинская Е.В. // под общ.ред. проф. Павлыша В.Н., проф. Назимко Е.И. – Донецк: «ВИК», 2014. – 289 с.
2. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А., Турчанин Г.И. Совершенствование системы управления процессом гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. – С. 64-67.
3. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Модификация характеристик аппаратного обеспечения системы управления процессом увлажнения угольного пласта / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов IX Международной научно-методической конференции в городе Сухум с 01 – 09 октября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. – С.183-187.
4. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Моделирование процесса удаления влаги из углесодержащих осадков. / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ, 2011. – вип. 45(86). – С. 153-158.
5. Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г. Моделирование процесса фильтрации при механическом воздействии на

осадок. / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Висник КТУ 36.наук. праць - КривийРіг, 2011. - вип. 27. - С.191-195.

6. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Имитационное моделирование изменения поровой структуры осадков при механическом воздействии. /Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. (Доклади XV междунар. науч.-практ. конф. «Обогащение полезных ископаемых» г. Бердянск, 24-26 мая 2012 г) – Дніпропетровськ, 2012. – вип. 50(91) – С. 158-163.

7. V.N. Pavlysh, L.A. Lazebnaya, Ismail HaserDayeh, E.V. Perinskaya The mathematical modeling and automatic control of pneumohydrodynamic treatment process on underground rock massifs / Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2015. -Вып. 1. - С.104-109.

8. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование процессов функционирования специализированных аппаратов конвективного типа / международный рецензируемый научно-теоретический журнал

«Проблемы искусственного интеллекта», 2015 № 1(15). – Донецк, ГУ ИПИИ, 2015. – с.89-98.

9. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Постановка задачи математического моделирования процесса конвективной диффузии многокомпонентной смеси при производстве композитных материалов / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // Сборник трудов VIII Международной научно-методической конференции в г. Хаммамет (Тунис) с 28 сентября по 5 октября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. – С. 102-105.

10. Павлыш В.Н., Перинская Е.В. Математическое моделирование процесса конвективного перемешивания компонентов ферритового материала для электронной техники / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции в г. Севастополе, 15 – 20 сентября 2014 г. – Донецк: МСМ, 2014. – С. 202-206.

*Перинская Е. В. Математическое моделирование и автоматизация управления процессом динамического воздействия на многокомпонентные массы. В данной статье рассматривается задача разработки методов повышения эффективности процесса динамического перемешивания неоднородной массы в аппаратах конвективного типа. Модернизация геометрических параметров проводится на основании результатов математического моделирования процесса и являются стационарными характеристиками. Выбор критериев оценки повышения эффективности при модификации параметров производится в соответствии с основным требованием: повышение равномерности распределения перемешиваемой массы в рабочем объеме аппарата. В качестве одного из вариантов решения задачи предлагается разработать систему автоматизированного управления процессом. Теоретической базой системы является комплекс математических моделей и параметров оборудования.*

**Ключевые слова:** математическая модель, управление, процесс, параметр, система.

*Perinskaya E. Mathematical modeling and automation of control over the process of dynamic action on multicomponent masses. This article discusses the problem of developing methods to improve the efficiency of the process of dynamic mixing of an inhomogeneous mass in convective-type devices. Modernization of geometric parameters is carried out on the basis of the results of mathematical modeling of the process and are stationary characteristics. The choice of criteria for evaluating the increase in efficiency when modifying the parameters is made in accordance with the main requirement: an increase in the uniformity of the distribution of the mixed mass in the working volume of the apparatus. As one of the options for solving the problem, it is proposed to develop an automated process control system. The theoretical basis of the system is a set of mathematical models and equipment parameters. As one of the options for solving the problem, it is proposed to develop an automated process control system. The theoretical basis of the system is a set of mathematical models and equipment parameters.*

**Key words:** mathematical model, control, process, parameter, system.

Статья поступила в редакцию 13.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

УДК 004.928, 004.93

## Поиск ключевых точек лица для задачи распознавания эмоций

А.П. Семёнова, В.Н. Павлыш  
Донецкий национальный технический университет

e-mail: [nastena-semenova19@rambler.ru](mailto:nastena-semenova19@rambler.ru)

### **Аннотация**

*В работе рассматривается задача определения ключевых точек лица на фотоизображениях для распознавания эмоций по мимическим микровыражениям. Приведен анализ наиболее известных алгоритмов построения ключевых точек. Определены мимические признаки для распознавания базовых эмоций. Предложен метод построения контурной модели лица по ключевым точкам с использованием NURBS-кривых.*

### **Введение**

В основе распознавания истинного лица человека лежит распознавание эмоций [1-3]. Эмоциональное состояние человека наиболее точно характеризует именно мимика человека. В работах [4-7] доказано, что эмоция состоит на 55% из мимики, 38% интонации голоса и 7% составляют сказанные слова. Мимические микровыражения способны отобразить информацию, которую человек сознательно или бессознательно пытается скрыть. Однако, из-за слишком короткой продолжительности, мимические микровыражения обычно остаются незамеченными.

Общение между людьми невозможно без проявления и анализа эмоций. Поэтому моделирование и распознавание эмоций является актуальным и важным направлением исследований при создании систем компьютерного распознавания и синтеза зрительных образов [8]. Задача распознавания эмоций может решаться в системах, применяемых в различных сферах человеческой деятельности. К наиболее значимым областям применения можно отнести: распознавание состояния водителя, криминалистику, маркетинговые исследования, человеко-машинное взаимодействие, системы безопасности и виртуальной реальности, online-обучение и др. [9].

Одним из этапов решения задачи распознавания эмоций по фотоизображениям является построение контурной модели лица человека [10], которую можно построить с помощью ключевых точек. Рассмотрим некоторые из них.

### **Основные методы поиска ключевых точек**

Существует множество алгоритмов поиска ключевых точек на изображении.

Рассмотрим наиболее значимые из них. Первые методы поиска ключевых точек основаны на подборе параметров деформации для лицевой модели. Наиболее известные классы алгоритмов включают Active Shape Model (ASM), Active Appearance Model (AAM), Constrained Local Model (CLM) [11,12]. С помощью деформируемой модели лица вычисляются координаты каждой ключевой точки. Часто такие алгоритмы используют в качестве основы статистические методы. Они достаточно хороши на наборах данных в контролируемых условиях (правильное освещение, наклон головы и т.д.), но плохо справляются с обработкой зашумленных изображений.

Лучший результат поиска ключевых точек лица на наборах данных с большой вариацией поз и частичным перекрытием показывают регрессионные нейросетевые методы:

- прямые регрессионные методы, в которых модель предсказывает координаты  $x$ ,  $y$  для каждой ключевой точки;

- регрессионные методы тепловой карты, при использовании которых для каждой ключевой точки строится отдельная тепловая карта с вероятностями нахождения этой точки в некотором месте изображения.

Оценка самих координат производится выбором наиболее вероятного месторасположения для каждой из точек.

Dlib [13] является библиотекой машинного обучения с открытым кодом. В ней реализован алгоритм ERT – каскадный алгоритм для поиска ключевых точек, основанный на градиентном бустинге, где на каждой итерации уточняется шаблон лица, построенный поверх найденного лица алгоритмом Виолы-Джонса. Основным преимуществом данного алгоритма является высокая скорость работы при достаточно высоком качестве предсказания положения ключевых точек.

Multi-task Cascaded Convolutional Networks (MTCNN) [14] – нейронная сеть обучается сразу нескольким задачам: распознавание лиц и выделение ключевых точек (5 точек: глаза, кончик носа, углы рта), благодаря чему улучшается качество решения для обеих задач. Сеть представлена в виде каскада из трёх подсетей, каждая из которых предсказывает рамки лица, вероятность нахождения в ней лица и пять ключевых точек:

– сеть предложений (P-Net) – быстрая полносвёрточная сеть, работающая на исходном изображении в нескольких масштабах. Количество предсказанных сетью рамок уменьшается с помощью алгоритма подавления максимумов (NMS);

– сеть уточнения (R-Net) – работает только с частями изображения в предсказанных рамках;

– сеть выхода (O-Net) – проводит окончательное уточнение, ей на вход поступает лишь небольшое количество участков изображения

Для повышения качества распознавания необходимо обучить сети одновременно решать следующие задачи:

- 1) классификация зон лицо / не лицо;
- 2) регрессия координат ограничивающих рамок;
- 3) локализация ключевых точек лица.

Для каждой из этих задач устанавливается свой вес  $a$ :

для P-Net и R-Net  $a_1=1, a_2=a_3=0,5$ ;

для O-Net  $a_1=1, a_2=0,5, a_3=1$ .

### Задача поиска ключевых точек

Пусть дано входное изображение  $I$ , размера  $W \times H$ , где  $W$  – ширина,  $H$  – высота. Для построения контурной модели изображения  $I$  необходимо определить множество ключевых точек  $P$  в тех зонах лица, где наблюдаются наиболее сильные мимические изменения при возникновении тех или иных эмоций.

Под ключевой точкой  $p_i$  будем подразумевать такую точку на изображении  $I$ , которая находится на некотором важном для классификации эмоции фрагменте изображения.

Задачей поиска ключевых точек называется задача нахождения некоторой функции  $F: I \rightarrow P$ , предсказывающей по входному изображению  $I$  вектор ключевых точек  $P$ , содержащий координаты  $x, y$  каждой из них.

Качество построения функции  $F$ , как правило, проверяется на тестовых наборах данных. Количество ключевых точек может быть разным в зависимости от цели их выявления и обучающего набора данных. Для определения достаточного объема ключевых

точек при распознавании эмоций необходимо выделить основные мимические признаки.

### Мимические признаки базовых эмоций

Эмоции и физиологические реакции организма регулируются одними и теми же мозговыми структурами, а значит, тесно взаимосвязаны друг с другом. Эмоциональные переживания выступают условием для физиологических изменений лица, т.е., фактически, формируют контур и рельеф лица (морщины также являются следствием эмоциональной напряженности мимической мускулатуры). Это подтверждают в своих работах С. Томкинс [15], Э. Геллгорн и К. Изард [15], П. Экман и У. Фризен [5-7], [16].

П. Экман и У. Фризен утверждали о существовании универсальных мимических выражений для конкретных эмоций у разных людей [5, 7]. В качестве универсальных эмоций использовались: злость, страх, отвращение, горе, удивление, презрение, радость.

Разные люди могут демонстрировать одни и те же эмоции по-разному (разная интенсивность, продолжительность и т.д.), поэтому ученые предприняли попытку систематизировать и обобщить мимические выражения человека. В результате была разработана система кодирования лицевых движений FACS (Facial Action Coding System). В FACS лицо делится на 44 части (нос, губы, брови, веки и т.д.), соответствующие движения которых обозначают конкретное мимическое выражение [7].

Любая эмоция подготавливает человека к какому-то конкретному событию. Это событие может происходить с внешним объектом или с самим человеком. Поэтому качество классификации выражений лица зависит от модальности эмоций, интенсивности и локализации мимических проявлений. В работах [17-21] предложено описывать эмоции используя набор бинарных признаков. Для обозначения эмоции используется вектор со следующими признаками:

$$E_i^t = (e_1, e_2, e_3), i = \overline{1,8}, \quad (1)$$

где  $e_1$  – бинарный признак определяющий знак эмоции: 1 – позитивная эмоция (возникает в связи с удовлетворением потребности или достижением цели), 0 – негативная эмоция (возникает в связи с неудовлетворением или недостижимостью цели);

$e_2$  – бинарный признак, который определяет время возникновения эмоции относительно события: 0 – предвидящая эмоция (возникает до события с достижением или не достижением цели, предшествуют ей), 1 –

констатирующая эмоция (возникает после события);

$e_3$  – бинарный признак, который определяет направленность эмоций: 1 – эмоция направлена на себя, 0 – эмоция направлена на внешние объекты или других людей;

$t$  – признак, который описывает группы эмоций по источнику их происхождения.

Комбинируя три описанных бинарных признака, получаем 8 различных вариантов, соответствующих базовым эмоциям: горе, радость, страх, надежда, гнев, удовольствие, интерес, пренебрежение.

Каждая базовая эмоция имеет характерные черты хотя бы в одной из мимических зон. В процессе распознавания они выполняют функцию информационной опоры. Наиболее значимые признаки эмоции локализируются в области наиболее сильных (для данной эмоции) мимических изменений. Если эмоция предполагает несколько зон с интенсивными изменениями, то ведущие признаки локализируются в нижней части лица (страх, гнев, горе, радость). Если экспрессивное выражение содержит несколько зон с равными изменениями средней интенсивности, то ведущие признаки могут локализоваться в области лба и бровей (горе, спокойствие, надежда). В работе [22] предложено, использовать для распознавания эмоций следующие зоны лица:

1. Область лба и бровей (внешние и внутренние концы бровей, а также их середина; наличие морщин на лбу; наличие морщин между бровями);

2. Область глаз (внешние и внутренние уголки верхних и нижних век, а также их середина; наличие морщин под нижними веками);

3. Область рта (уголки губ; середина верхней и нижней губы).

В таблице 1 приведены мимические признаки для описания базовых эмоций в соответствии с выделенными областями лица человека.

Используя полученные мимические проявления можно получить 21 характеристический признак для описания базовых эмоций. Комбинация этих признаков создает базис мимических проявлений эмоций. Таким образом, мимические проявления эмоций ( $E$ ) можно представить в виде вектора:

$$E_i^t = (v_1, \dots, v_{21}), i = \overline{1,8}, \quad (2)$$

где  $v_i \in [0;1]$  – мимический признак (если  $v=0$ , то признака нет; если  $v=1$  – признак имеет максимальное влияние).

Таблица 1 - Мимические характеристики базовых эмоций

Базовая эмоция	Мимическое описание
Пренебрежение	1. Брови приподняты. 2. –. 3. Уголки губ опущены.
Страх	1. Брови подняты и сведены. Морщины в центре лба. 2. Верхние веки сильно подняты. Нижние веки приподняты и напряжены. 3. Рот раскрыт, губы растянуты и напряжены.
Гнев	1. Брови опущены и сведены. Вертикальные морщины между бровями. 2. Верхние веки напряжены. Нижние веки напряжены и приподняты. 3. Рот закрыт, губы сжаты.
Горе	1. Внутренние уголки бровей подняты вверх. 2. Внутренние уголки верхних век приподняты. 3. Рот закрыт, уголки губ опущены.
Интерес	1. Брови приподняты. Морщина на лбу 2. Веки немного расширены. 3. –.
Надежда	1. Верхние уголки бровей подняты вверх. 2. Верхние веки приподняты. 3. –.
Удовольствие	1. –. 2. –. 3. Уголки губ оттянуты в стороны и приподняты.
Радость	1. Брови и лоб спокойны. 2. Верхние веки спокойны. Нижние веки приподняты. Морщины под нижними веками. Вокруг внешнего края уголков глаз морщины – «гусиные лапки». 3. Уголки губ оттянуты в стороны и приподняты. Носогубные морщины.

Набор из 8-ми векторов, обозначенных таким образом, образуют базис пространства мимических проявлений эмоциональных состояний:  $A_{ij}$ , где  $i = \overline{1,21}$ ,  $j = \overline{1,8}$ .

Таким образом, свободный вектор  $V = (v_1, \dots, v_{21})$ , полученный путем анализа изображения с каким-либо эмоциональным состоянием, можно разложить по базису  $A$  и

получить описание эмоций, как выпуклой комбинации [20, 21, 23]:

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot V, \quad (3)$$

где  $A$  – базисная матрица эмоциональных состояний;

$A^T$  – транспонированная матрица  $A$ ;

$V$  – вектор, описывающий мимические проявления произвольного эмоционального состояния;

$X = (x_1, \dots, x_8)$ , где  $x_i$  – коэффициент выпуклой комбинации для каждой из восьми базовых эмоций ( $\sum a_i = 1, a_i \in [0;1]$ ).

### Построение контура лица по ключевым точкам

Для классификации эмоций необходимо использовать геометрический (для расстояний) и текстурный (для морщин) анализ изображения. При этом мимические признаки можно разделить на односторонние – те, которые характеризуются лишь степенью своего наличия (в основном это относится ко всем морщинам), и двусторонние – те, которые характеризуются знаком (например, брови могут быть как подняты, так и опущены).

При расчете текстурных признаков областей лица можно использовать различные методы фильтрации изображений. Для определения степени выраженности мелких морщин (например, в области лба) можно вычислить меру среднеквадратического разброса  $S$  значений пикселей по области. Для определения степени выраженности единичных крупных направленных морщин (например, в области носогубной складки) предлагается использовать двумерные фильтры Габора.

Расчет геометрических признаков проводят на основе координат контрольных точек лица. Для определения ключевых точек можно использовать метод Виолы-Джонса, предварительно задав определенные выше области лица (верхняя зона для бровей и глаз, нижняя для рта) и выполнив следующие действия:

- преобразование цветного изображения к полутоновому виду;
- преобразование из полутонового к бинарному виду;
- применение к бинарному изображению градиентной маски;
- локализацию ключевых точек.

Полученные ключевые точки можно использовать для выделения характерных признаков черт лица с помощью NURBS-кривых (см. рис. 1-2).



Рисунок 1 – Контурсы: а) левая бровь, б) губы



Рисунок 2 – Контур глаз: а) верхнее веко, б) нижнее веко

Рассмотрим построение NURBS-кривых подробнее. Пусть задан массив ключевых точек  $p_0, \dots, p_m$ . Необходимо найти функцию  $p(u) = [x(u), y(u), z(u)]^T$ , обозначенную на интервале  $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ , чтобы она была достаточно гладкой и проходила около ключевых точек. Допустим, что есть последовательность узлов  $u_0, u_1, \dots, u_n$ , такая что:

$$u_{\min} = u_0 \leq u_1 \leq \dots \leq u_n = u_{\max}. \quad (4)$$

При использовании аппроксимации сплайнами функция  $p(u)$  принимает вид полинома степени  $d$  на интервале между соседними узлами:

$$p(u) = \sum_{j=0}^d c_{jk} u^j, \quad u_k < u < u_{k+1}. \quad (5)$$

Таким образом, чтобы найти сплайн степени  $d$ , необходимо найти  $n(d+1)$  трёхмерный вектор-коэффициентов  $c_{jk}$ . Необходимые для этого уравнения можно получить, рассматривая разного рода ограничения, связанные с непрерывностью функции и критерием близости к ключевым точкам.

Такой подход к формированию сплайна является глобальным. Необходимо решить систему из  $n(d+1)$  уравнений относительно  $n(d+1)$  неизвестных, а значит, каждый полученный коэффициент будет зависеть от всех ключевых точек.

Такая методика определения коэффициентов сплайна обеспечивает получение гладкой кривой, проходящей через заданные ключевые точки.

Подход, выбранный для формирования В-сплайнов, состоит в том, чтобы обозначить сплайн в терминах базисных функций, каждая из которых отлична от нуля только на интервале в несколько узлов. Таким образом, функцию  $p(u)$  можно записать в виде:

$$p(u) = \sum_{i=0}^m B_{id}(u) p_i, \quad (6)$$

где каждая функция  $B_{id}(u)$  является полиномом степени  $d$  на интервале в несколько узлов и равна нулю за границами этого интервала.

Существует много способов обозначения базисных функций, но особенное место принадлежит – методу рекурсивных функций Кокса-де Бура:

$$B_{k,0} = \begin{cases} 1, & \text{если } u_k \leq u \leq u_{k+1} \\ 0 & \text{в другом случае} \end{cases} \quad (7)$$

$$B_{k,d} = \frac{u - u_k}{u_{k+1} - u_k} B_{k,d-1}(u) + \frac{u_{k+1} - u}{u_{k+d+1} - u_{k+1}} B_{k+1,d-1}(u)$$

## Заключение

В работе рассмотрена задача поиска ключевых точек лица человека на фотоизображениях, выполнен анализ существующих подходов к ее решению. Приведены результаты исследования по определению мимических признаков, наличие которых важно для определения присутствия или отсутствия базовой эмоции. Предложен метод построения контурной модели лица человека для задачи классификации эмоций с использованием NURBS-кривых.

## Литература

1. Ильин, Е. П. Эмоции и чувства / Е. П. Ильин – СПб: Питер, 2001. – 752 с.
2. Джеймс, У. Психология / У. Джемс. – М.: Педагогика, 1991. – 368 с.
3. Ланге, Г. Душевные движения / Г. Ланге. – СПб.: Питер, 1996. – 180 с.
4. Ming-Hsuan, Yang. Detecting Faces in Images: a Survey / Yang Ming-Hsuan // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002. – № 11. – P. 34–58.
5. Friesen, W. EMFACS-7: Emotional Facial Action Coding System. Unpublished manual / W. Frisen, P. Ekman. – California: University of California, 1983.
6. Экман, П. Психология эмоций. Я знаю, что ты чувствуешь. / П. Экман – СПб. : Питер, 2010. – 334 с.

7. Ekman, P. Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement / P. Ekman, W. Friesen. – Palo Alto: Consulting Psychologists Press, 1978. – 117 p.
8. Визильтер, Ю. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. / Ю. В. Визильтер – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
9. Семенова, А. П. Область применения алгоритма распознавания эмоций в информационных технологиях / А. П. Семенова, А. С. Миненко, Т. В. Ванжа // Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Брянск, 30 ноября 2018 г.), Брянск: Брян. гос. инженерно-технол. ун-т., 2018. – С. 443-446.
10. Семёнова, А.П. Анализ методов распознавания выражений лица / А. П. Семёнова, А.С. Миненко // Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение: материалы Донецкого международного научного круглого стола. – Донецк: ГУ ИПИИ, 2020. – С. 192-197.
11. Wang, N. Facial feature point detection: A comprehensive survey. / N. Wang [et al.] // Neurocomputing, 2018. – №275. – P. 50-65.
12. Wu, Y. Facial Landmark Detection: A Literature Survey / Y. Wu, Q. Ji // International Journal of Computer Vision, 2018. – №.127. – P. 115-142.
13. Kazemi, V. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees / V. Kazemi, J. Sullivan // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 23-28 June 2014, Columbus, OH (USA). – P. 1867-1874.
14. Zhang, K. Joint Face Detection and Alignment Using Multitask Cascaded / K. Zhang [et al.] // Convolutional Networks IEEE Signal Processing Letters, 2016. – №.10(23). – P. 1499-1503.
15. Вилюнас, В. К. Психология эмоций. Тексты / Под ред. В. К. Вилюнаса, Ю. Б. Гиппенрейтер. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 288 с.
16. Куприянов, В. В. Лицо человека: анатомия, мимика. / В. В. Куприянов, Г. В. Стовичек – М.: Медицина, 1988. – 272 с.
17. Миненко А. С. Информационные технологии при моделировании и распознавании лица человека по его мимическим изображениям / А. С. Миненко, А. П. Семенова // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ – 2017). Сборник материалов VIII Международной научно-технической конференции в рамках III Международного Научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные

перспективы Донбасса». – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 375-380.

18. Миненко, А. С. Анализ эмоционального состояния человека на основе математического моделирования / А. С. Миненко, А. П. Семенова // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ – 2018). Сборник материалов IX Международной научно-технической конференции в рамках IV Международного Научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк: ДонНТУ, 2018. – С. 22-25.

19. Миненко, А. С. Анализ эмоционального состояния человека по фотографическим изображениям / А. С. Миненко, А. П. Семенова // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ – 2019). Материалы X Международной научно-технической конференции в рамках V Международного

Научного форума Донецкой Народной Республики «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 123-126.

20. Миненко, А. С. Формальная модель эмоций / А. С. Миненко, А. П. Семенова // Проблемы искусственного интеллекта, 2018. – №3(10). – С. 84-93.

21. Семенова, А. П. Математическая модель эмоций // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Материалы национальной конференции с международным участием. – Белгород, 2019. – С. 4584-4587.

22. Семёнова, А. П. Анализ мимических выражений для задачи распознавания эмоций / А. П. Семёнова, В. Н. Павлыш // Проблемы искусственного интеллекта, 2020. – №4(19). – С. 69-79.

23. Снетков, В. А. Габитоскопия / В. А. Снетков – Волгоград: ВСИ МВД СССР, 1979. – 182 с.

**Семёнова А. П., Павлыш В. Н. Поиск ключевых точек лица для задачи распознавания эмоций.** В работе рассматривается задача определения ключевых точек лица на фотоизображениях для распознавания эмоций по мимическим микровыражениям. Приведен анализ наиболее известных алгоритмов построения ключевых точек. Определены мимические признаки для распознавания базовых эмоций и приведено их описание. Предложен метод построения контурной модели лица по ключевым точкам с использованием NURBS-кривых. Изложенная методика определения коэффициентов сплайна обеспечивает получение гладкой кривой, проходящей через заданные ключевые точки.

**Ключевые слова:** мимические микровыражения, базовые эмоции, ключевые точки лица, контурная модель, NURBS.

**Semenova A. P., Pavlysh V. N. Search key points for facial emotion recognition task.** The paper is devoted to the task of detection key points of the face for emotion recognition based on facial microexpressions. The analysis of the most well-known algorithms for constructing key points is done. The mimic features for recognition of basic emotions are defined and described. The method for constructing a contour model of a face based on key points using NURBS curves is proposed.

**Key words:** mimic microexpressions, basic emotions, key points of the face, contour model, NURBS.

Статья поступила в редакцию 12.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Шелеповым В.Ю.

УДК 004.8

## Анализ данных телеметрии и надежности малых космических аппаратов

В. Ю. Скобцов

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Витебск

e-mail: vasko\_vasko@mail.ru

### **Аннотация**

*В работе представлены решения актуальных задач анализа данных телеметрической информации и надежности бортовой аппаратуры малых космических аппаратов. Разработан комплекс программных средств и методик интеллектуального анализа данных телеметрической информации и оценивания показателей надежности бортовой аппаратуры малых космических аппаратов. Программный комплекс реализован в десктоп- и веб-версиях и имеет гибкую сервис-ориентированную архитектуру.*

### **Введение**

Одной из важнейших задач на всех этапах жизненного цикла малых космических аппаратов (МКА) является анализ данных телеметрической информации (ТМИ), показателей надежности и живучести бортовой аппаратуры (БА) МКА с точки зрения определения их технического состояния и обеспечения работоспособности. Их актуальность обусловлена прежде всего тем, что одной из основных причин потерь МКА являются отказы, сбои и некорректная работа систем БА МКА.

Большое количество информации, поступающей и накапливающейся в специализированных банках данных с МКА, может быть эффективно использовано для совершенствования анализа надежности и определения технического состояния МКА и его подсистем. Поэтому актуальным является исследование, разработка и применение методик и алгоритмов, которые позволяют анализировать такого рода данные с возможностью извлечения из них полезной информации и последующего построения с их использованием кластерно-классификационных и прогностических моделей для определения технического состояния МКА с целью принятия корректных управляющих и эксплуатационных решений МКА.

В этом случае мы анализируем функционирование МКА как «черного» или «серого» ящика только на основе данных ТМИ. Однако, существует информация о структуре и логике функционирования МКА и его подсистем, которую также можно использовать при решении выше указанных задач. В этом случае перспективным является использование логико-вероятностного подхода и методов диагностики цифровых систем, которые позволяют использовать и анализировать как логико-структурную информацию об МКА и

режимах его работы, так и его вероятностные характеристики.

Методы машинного обучения, искусственного интеллекта и биоинспирированных моделей являются на текущий момент одними из самых перспективных и широко используемых подходов в анализе данных высокотехнологичных систем. Яркими и широко известными примерами их применения являются разработки таких компаний как Yandex, Facebook, Google, Amazon, научно-исследовательских центров МИТ, университетов Кэмбриджа, Стенфорда, Беркли, Принстона, Южной Калифорнии, МГТУ им. Баумана, МФТИ, ВШЭ. С другой стороны логико-вероятностный подход и методы цифровой диагностики также являются современными широко распространенными и сертифицированными способами анализа и определения технического состояния высокотехнологичных систем. Так, программный комплекс ПК АРБИТР (РФ) создан на основе логико-вероятностного метода и аттестован 15 июня 2017 г. сроком на 10 лет и разрешён к применению на предприятиях Ростехнадзора РФ, в том числе критически важных объектах [1].

В современных условиях для решения перечисленных задач, обеспечения требуемой степени автономности, качества и оперативности управления такими сложными объектами как МКА необходимо выполнить комплексную автоматизацию и интеллектуализацию процессов оценивания и много-модельного анализа данных ТМИ, показателей надежности и живучести БА МКА.

Однако, в большинстве случаев на практике автоматизация выполнена, в лучшем случае, лишь частично, и многое делается

зачастую вручную, базируясь на эвристических правилах [2].

Таким образом, задачи интеллектуального анализа данных ТМИ и надежности БА МКА являются актуальными и востребованными. При этом разработка и применение методов анализа данных телеметрии МКА на основе технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и биоинспирированных систем, методов на основе логико-вероятностного подходов и алгоритмов цифровой диагностики позволяет на новом научно-техническом теоретическом и прикладном уровнях решить поставленные задачи и повысить эффективность принимаемых управленческих и эксплуатационных решений наземного комплекса управления (НКУ) МКА.

С целью решения данных актуальных задач, в рамках программы Союзного государства «Мониторинг СГ» был разработан экспериментальный образец комплекса программных средств и методик для оценивания и анализа показателей надежности и живучести БА МКА и интеллектуального анализа данных телеметрии БА МКА.

### Состав и функции комплекса программных средств и методик

Разработанный комплекс программно-методического обеспечения позволяет выполнять многомодельный и многокритериальный анализ данных ТМИ и надежности БА МКА.

В состав разработанного комплекса входят (рис. 1):

- программный модуль и методика интеллектуального анализа данных (ПМ ИАД) ТМИ БА МКА;
- программный модуль и методика логико-вероятностной оценки показателей надежности (ПМ ЛВОН) БА МКА;
- программный модуль и методика интервальной оценки показателей надежности (ПМ ИОН) БА МКА;
- вспомогательные программные модули визуализации полученных результатов, импорта/экспорта хранения данных.

Комплекс реализован в двух версиях: десктоп- и web-версии (рис. 1).

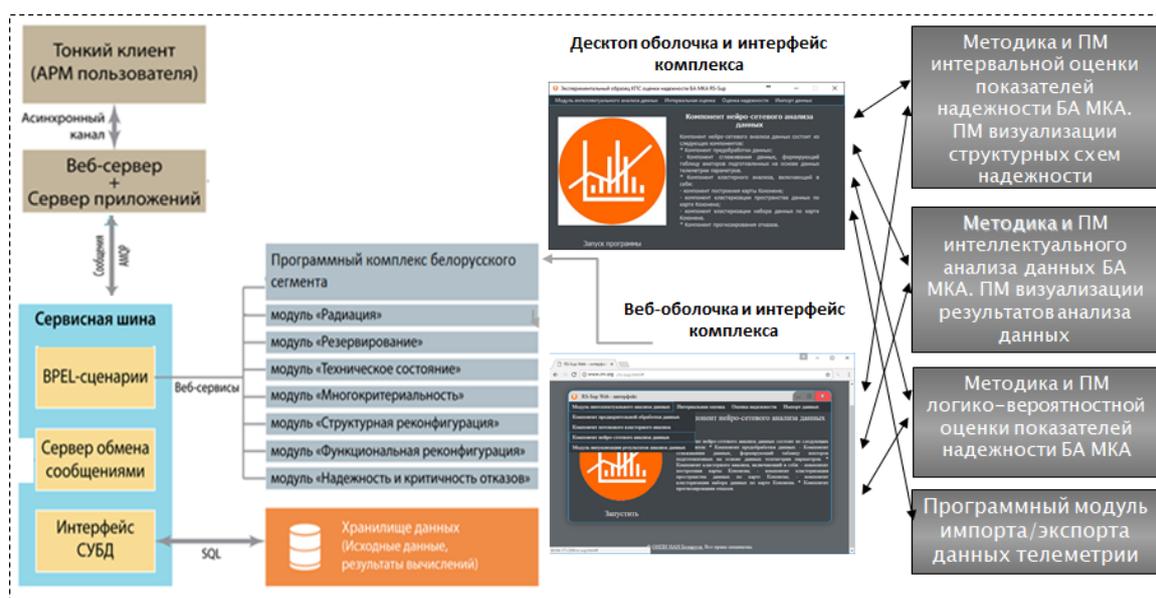


Рисунок 1 - Структурно-функциональная схема комплекса и его распределенной интеграции с партнерским российским комплексом

Десктоп-версия - для его использования пользователем локального компьютера. Web-версия - для удаленной работы пользователя через веб-интерфейс и интегрирована как распределенный белорусский сегмент в программно-моделирующий комплекс российского сегмента СПИИРАН (Санкт-Петербург) [3,4]. При разработке комплекса применена сервис-ориентированная архитектура: алгоритмическая часть комплекса реализована как набор консольных приложений, которые

затем «обернуты» в десктоп- и web-оболочки, реализуя таким образом соответствующие сервисы.

### Программный модуль интеллектуального анализа данных телеметрии БА МКА

Программный модуль и методика интеллектуального анализа данных предназначены для анализа данных о состоянии-

функционировании БА МКА на основе данных ТМИ: предобработки данных ТМИ, отбора существенных признаков, выделения потенциальных состояний анализируемых устройств путем кластеризации/классификации и прогнозной оценки среднего количества отказов/сбоев по кластерам-состояниям устройства и всему временному ряду ТМИ [4,5].

На рисунке 2 приводится структурно-функциональная схема программного модуля интеллектуального анализа данных о состоянии БА МКА. ПМ ИАД можно условно разделить на три функциональных блока, состоящих из множества компонентов, выполняющих определенные функции в процессе анализа данных.

1. Блок предобработки данных включает в себя:

- Компонент предобработки данных, который позволяет с использованием генетического алгоритма (ГА) и многокритериальной оптимизации отбирать информативные признаки, минимизируя пространство поиска для проведения

последующего кластерного анализа [4,5]. Результатом работы модуля является множество отобранных признаков в виде бинарного характеристического вектора, а также визуализация оценочных функций ГА.

- Компонент предобработки данных, формирующий таблицу векторов, подготовленных на основе данных ТМИ, необходимых для работы группы компонентов кластеризации/классификации нейросетевого анализа данных [4,5]. С одной стороны выполняется сглаживание шумов, с другой стороны усиление и стабилизация переходов, свидетельствующих об изменении состояния системы. Экспериментально установлено, что данные, прошедшие обработку данным компонентом, проявляют большую стабильность с точки зрения непрерывного пребывания в определенных кластерах. К каждому каналу данных может быть применено эвристическое правило предобработки, которое может быть задано пользователем. Как результат имеем предобработанные вектора данных ТМИ.

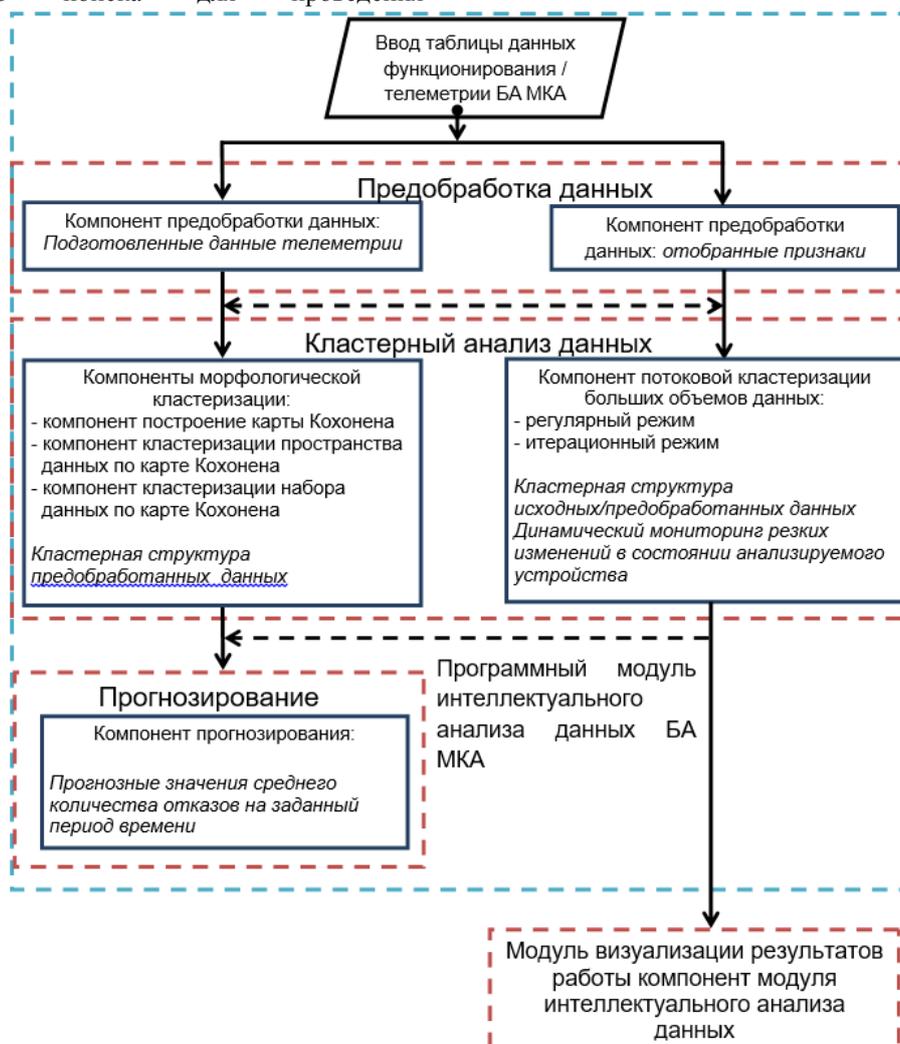


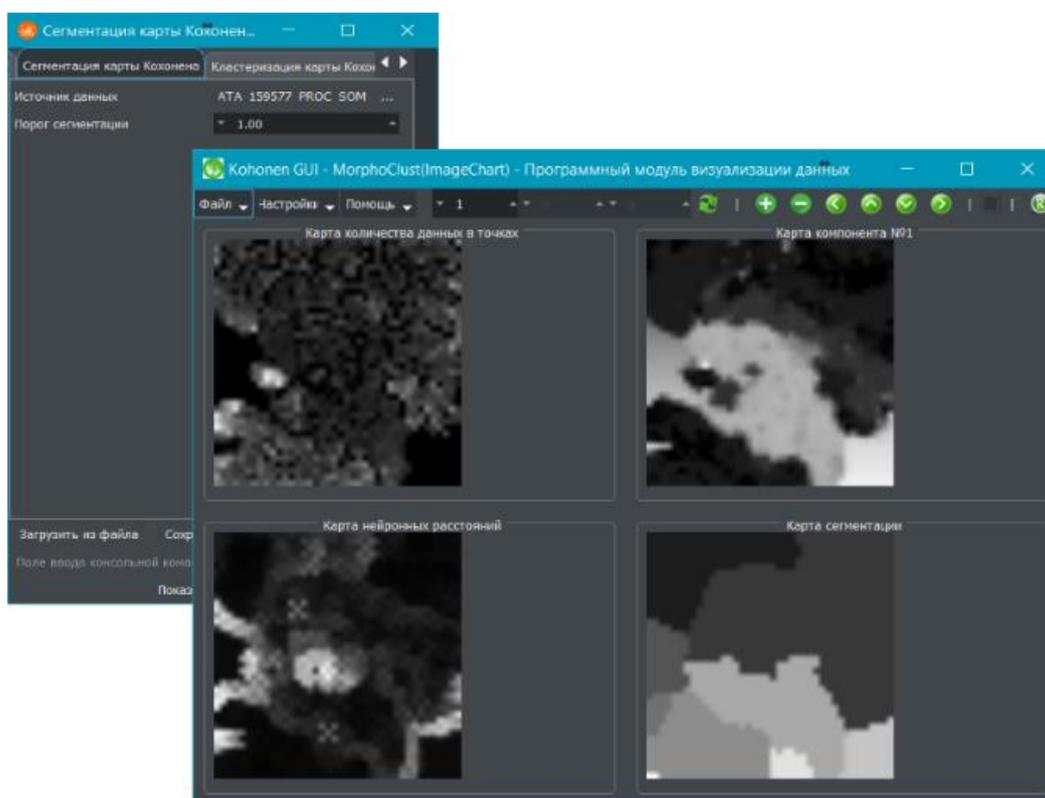
Рисунок 2 - Структурно-функциональная схема программного модуля интеллектуального анализа данных

2. Блок кластерного анализа включает в себя:

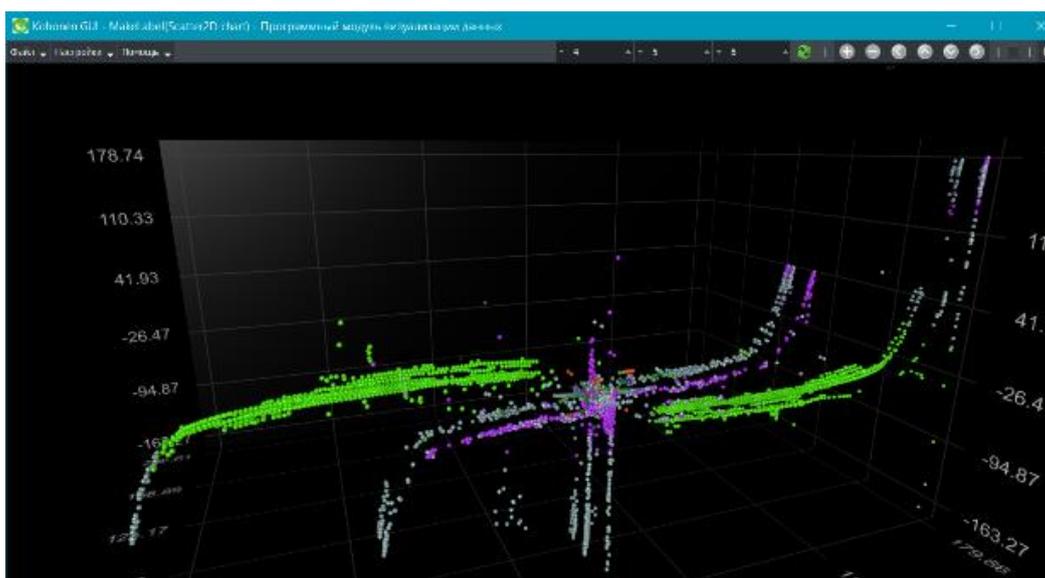
- Компоненты нейросетевого кластерного анализа: построения карты Кохонена, кластеризации пространства и набора данных по карте Кохонена [4,5]. Они выполняют кластеризацию/классификацию предобработанных данных ТМИ анализируемого устройства на основе применения самоорганизующейся карты

Кохонена, кластеризации визуального пространства карты межнейронных расстояний методами обработки изображений и кластеризации/классификации набора данных.

Результаты работы компонентов кластеризации пространства и набора данных по карте Кохонена с их визуализацией приведены на рисунке 3.



а)



б)

Рисунок 3 - Результаты работы компонентов кластеризации пространства и набора данных по карте Кохонена с их визуализацией

На рис. 3, а) в нижней левой ячейке приводится исходная карта межнейронных расстояний, в правой – она же после применения обработки и выделения сегментов-кластеров. На рис. 3, б) приводится пример 3-D визуализации результатов распределения векторов данных ТМИ по кластерам-состояниям, реализована также 2-D визуализация.

Этап кластеризации является этапом обучения на обучающей выборке данных. При анализе тестовых данных телеметрии полученные сегменты-кластеры рассматриваются как классы, и процесс распределения векторов преобразованной телеметрии по построенным кластерам становится процессом классификации.

- Компонент потоковой динамической кластеризации реализует в модуле ИАД альтернативный алгоритм кластерного анализа, основанный на двухуровневом подходе для проведения итерационной, микро- или макрокластеризации данных [4-7].

Эксперименты на системах БА МКА показали, что выделяемые кластера-классы данных ТМИ характеризуют их технические или функциональные состояния, например состояния циклограмм.

3. Блок прогнозирования включает в себя компонент прогнозирования, который выполняет оценку прогнозных значений среднего количества отказов или недостоверных показаний для выделенных кластеров-состояний и всего набора данных как индикатора работоспособности анализируемого оборудования БА МКА [4,5].

Алгоритм прогнозирования состоит из двух этапов. На первом этапе алгоритма формируется список значений количества отказов по всем возможным периодам, определённым на заданной последовательности данных. На следующем этапе вычисляются значения среднего количества отказов, как по полному списку, так и по подпискам с учётом значений меток кластеров/классов. Эксперименты на реальных данных телеметрии БА МКА размерностью сотни тысяч векторов показали уровень доверительной вероятности не ниже 0.9.

В ПМ ИАД интегрирован программный модуль 2-D и -3D визуализации результатов анализа данных [4,5] (рис.3).

### **Программный модуль логико-вероятностной оценки показателей надежности**

Программный модуль и методика логико-вероятностной оценки показателей надежности (ПМ ЛВОН) предназначены для оценки надежности и живучести системы на основании схемы функциональной целостности (логической схемы работоспособности системы) с возможностью учета влияния тепломеханических воздействий среды [4,9].

Разработанные ПМ ЛВОН и методика основаны на модифицированном логико-вероятностном методе (ЛВМ) [1,8,9]. Логико-вероятностный метод позволяет выявить наиболее критичные комбинации поражения элементов системы, защита которых, предотвращает попадание системы в опасное состояние. Таким образом, предоставляется возможность объективно установить приоритеты в разработке соответствующих систем защиты анализируемого оборудования.

В предложенном ПМ ЛВОН мы применяем модифицированный граф схемы функциональной целостности (СФЦ) – логико-структурной модели анализируемой системы: в дополнение к связям и структурным вершинам были введены логические вершины AND и OR (рис.4,5).

Это позволяет четко видеть системы с резервированием и без, а также данные логические вершины удобнее использовать в алгоритмах расчета вероятности безотказной работы и живучести систем, а также адаптировать для такой модели методы цифровой диагностики.

Граф СФЦ с учетом сделанной модификации будем проектировать таким образом, чтобы структурные элементы коммутировали между собой только через логические элементы. Как правило, схема создается на базе четырех логических конструкций (рис.5).

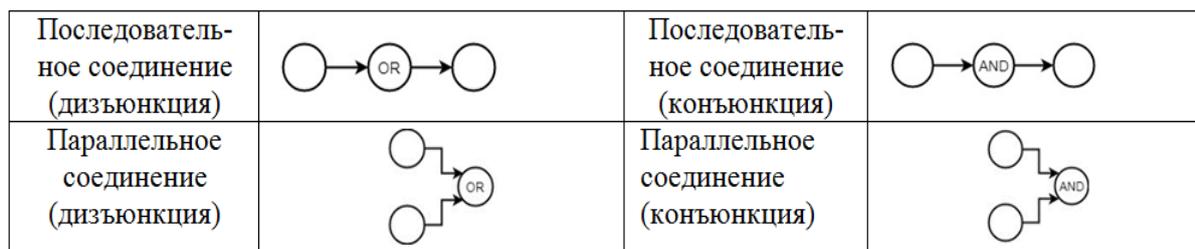


Рисунок 4 - Основные типы соединения в СФЦ

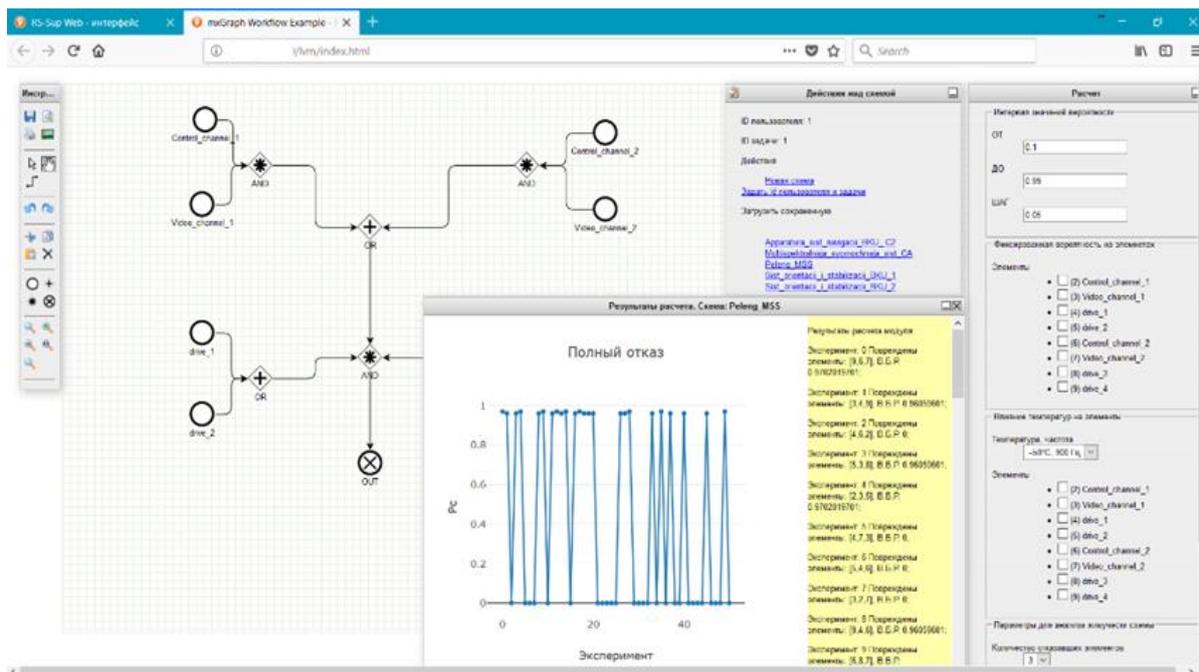


Рисунок 5 - Web-версия интерфейса объединяет в себе редактор СФЦ и окно расчетов

Введение данных логических вершин не изменяет значения вероятности безотказной работы систем при расчете. Для создания более сложных структур логические элементы можно коммутировать между собой в необходимом количестве.

Также мы не выполняем явного построения полиномов логической функции работоспособности и вероятностной функции [1,8,9]. Они строятся неявно в процессе обработки графа СФЦ и расчета показателей надежности, и живучести.

Web версия ПМ ЛВОН представлена на рис.5, и реализует следующие функции [4,9]:

- графический ввод СФЦ анализируемой системы БА МКА;
- расчет точечного значения показателя надежности (вероятности безотказной работы);
- анализ надежности систем БА МКА для серии значений показателей надежности элементов системы из заданного интервала с заданным шагом;
- анализ живучести систем БА МКА для полных и частичных отказов путем случайной генерации заданного числа пораженных элементов в течение серии экспериментов (число экспериментов задается), в случае полного отказа вероятность безотказной работы пораженных элементов равна 0, частичного отказа – вероятность безотказной работы снижается до значения  $\tilde{P}_i < P_i$ ;
- учет влияния тепломеханических воздействий на элементы систем БА МКА и возможность фиксации показателей надежности

отдельных элементов в процессе анализа надежности и живучести;

- построение графиков полученных зависимостей;

- вывод и сохранение результатов оценок показателей надежности, и анализа показателей надежности и живучести.

Проверка результатов разработанного ПМ ЛВОН выполнена путем сравнения полученных расчетных значений показателей надежности и живучести для некоторых систем БА МКА с результатами ПК «Арбитр» [1]. Сравнительный анализ показывает совпадение результатов.

### Заключение

Разработанный комплекс программных средств и методик имеет следующие основные преимущества и особенности:

- решение поставленных задач основано на мультимодельном подходе, и представлено несколькими вариантами методической и программной реализации, что позволяет разностороннюю проработку задач;
- комплекс имеет две версии реализации десктоп- и web-;
- применение модульной и сервис-ориентированной архитектуры обеспечивает возможность дальнейшего развития и адаптации комплекса программных средств и методик.

Программные модули комплекса тестировались на обработанных реальных данных телеметрии и системах БА МКА.

Результаты тестирования показали достаточно высокую точность расчетов.

Перспективным является развитие описанных программных средств и методик и применение методов искусственного интеллекта, машинного обучения и биоинспирированных моделей к решению задач основных этапов интеллектуального анализа данных ТМИ МКА:

1) уменьшение размерности пространства данных ТМИ МКА и выделения информативных признаков;

2) кластерного анализа, в том числе на основе ансамблевого подхода, и поиск в данных телеметрии кластеров, идентифицирующих штатное и нештатное техническое состояние МКА;

3) построение классификационных моделей, на основе одиночного или ансамблевого подходов, и осуществление идентификации штатного и нештатного технического состояния МКА;

4) комбинация кластерно-классификационных методов анализа данных телеметрии МКА с методами логико-вероятностного анализа МКА для повышения точности решения задачи определения технического состояния МКА.

### **Литература**

1. Можаяев, А. С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2011) // Труды Международной Научной Школы 'Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах' (МА БРК . 2011). - СПб.: Издательство ООО 'НПО 'Омега', 2011. - С. 56-61.

2. Охтилев, М. Ю. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы / М. Ю. Охтилев, Н. Г. Мустафин, В. Е. Миллер, Б. В. Соколов // Известия вузов. – М.: Приборостроение, 2014. – Том 57. – №11. – С. 7– 14.

3. Зеленцов, В. А. Сервис-ориентированный распределённый программный комплекс для оценивания и многокритериального анализа показателей надёжности и живучести бортовой аппаратуры малых космических аппаратов: российский и белорусский сегменты / В. А. Зеленцов, С. А. Потрясаев, Б. В. Соколов,

В. Ю. Скобцов, С. А. Коренько, Д. С. Ким, Е. Н. Вакульчик, Л. И. Кульбак, Е.Д. Николаеня, Н. В. Лапицкая, Р. В. Саксонов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2017. - Т. 16. - № 4. - С. 118-129.

4. Скобцов, В. Ю. Анализ показателей надежности, живучести и телеметрии бортовой аппаратуры малых космических аппаратов / В. Ю. Скобцов, С. В. Кругликов, Д. С. Ким, Н. А. Новоселова, В.И. Архипов, Л. И. Кульбак, Е.Д. Николаеня, Н. В. Лапицкая, Е. Н. Вакульчик, Р. В. Саксонов // Вопросы кибербезопасности, 2018. – №4(28). – С.54-69.

5. Skobtsov, V. Intelligent Telemetry Data Analysis of Small Satellites / V. Skobtsov, N. Novoselova, V. Arhipov, S. Potryasaev // In: Silhavy R., Senkerik R., Kominkova Oplatkova Z., Prokopova Z., Silhavy P. (eds) Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems. CSOC 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. - Springer International Publishing Switzerland, 2017. – Vol. 574. - PP. 351-361.

6. Скобцов, В. Ю. Исследование алгоритмов потоковой кластеризации в решении задачи анализа данных телеметрии малых космических аппаратов / В. Ю. Скобцов, Н. А. Новоселова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020. - Т. 63. - №11. - С.1003-1011.

7. Aggarwal C (ed.) Data Streams: Models and Algorithms. - Springer-Verlag, 2007.

8. Поленин, В. И. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства. Монография, научное издание / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свиринов и др. / Под ред. А.С.Можаяева. - СПб: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.

9. Skobtsov, V. Automated Logical-Probabilistic Methodology and Software Tool as Component of the Complex of Methodologies and Software Tools for Evaluation of Reliability and Survivability of Onboard Equipment of Small Satellites / V. Skobtsov, N. Lapitskaja, R.Saksonov, S. Potryasaev // In: Silhavy R. (eds) Software Engineering and Algorithms in Intelligent Systems. CSOC2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. - Vol.763. - PP. 452-463.

**Скобцов В. Ю.** *Анализ данных телеметрии и надежности малых космических аппаратов. В работе представлены решения актуальных задач анализа данных телеметрической информации и надежности бортовой аппаратуры малых космических аппаратов. Разработан комплекс программных средств и методик интеллектуального анализа данных телеметрической информации и оценивания показателей надежности бортовой аппаратуры малых космических аппаратов. Программный комплекс реализован в десктоп- и веб-версиях и имеет гибкую сервис-ориентированную архитектуру.*

**Ключевые слова:** интеллектуальный анализ данных, данные телеметрии, логико-вероятностный метод, комплекс программных средств и методик, программный модуль, программный компонент, сервис-ориентированная архитектура

**Skobtsov V. Yu.** *Analysis of telemetry data and reliability of small satellites. The paper presents solutions for the actual tasks of telemetry data and reliability analysis of small satellites onboard. A complex of software tools and methodologies was developed for intelligent analyzing the telemetry data and reliability indexes estimation of the onboard equipment of small satellites. The software package is implemented in desktop and web versions and has a flexible service-oriented architecture.*

**Keywords:** intelligent data analysis, telemetry data, logical-probabilistic method, complex of software tools and methodologies, software module, software component, service-oriented architecture

*Статья поступила в редакцию 26.04.2021  
Рекомендована к публикации доцентом Приваловым М. В.*

# **Компьютерные науки**

## Использование геометрических интерполянтов для численного решения уравнения Лапласа в прямоугольнике

О. А. Шевчук

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г.Макеевка

e-mail: [ks81@rambler.ru](mailto:ks81@rambler.ru)

### Аннотация

*В статье рассматривается решение краевой задачи первого рода для уравнения Лапласа в прямоугольнике с различными граничными условиями. Исследовано применение геометрических интерполянтов для численного решения указанных задач. Сравнение полученных результатов с точными решениями демонстрирует высокую степень достоверности предложенного метода. Поскольку уравнения Лапласа моделируют реальные динамические процессы как в природе, так и в технических объектах, применение методов геометрического моделирования для их решения является актуальной научно-технической задачей.*

### Введение

Важную роль при исследовании природных и технологических процессов играют математические модели, которые адекватно описывают изучаемые процессы и явления. При описании таких физических явлений, как теплопроводность, колебания струны, распространение линейных волн различной физической природы, напряженно-деформированное состояние различных конструкций или их отдельных элементов и др. достаточно часто встречаются уравнения в частных производных. Наиболее теоретически обоснованными, но достаточно сложными моделями являются уравнения математической физики, которые представляют собой дифференциальные уравнения (ДУ) в частных производных, описывающие процессы в пространстве и времени.

При исследовании стационарных процессов различной физической природы обычно приходят к уравнениям эллиптического типа. Наиболее распространенными уравнениями этого типа являются уравнения Лапласа [1, 2]:

$$\Delta U = 0,$$

где оператор Лапласа  $\Delta U$  в трехмерном пространстве имеет вид

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2},$$

если функция  $U$  зависит только от двух переменных, то

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}.$$

В работах [3-6] предложен метод численного решения ДУ с помощью геометрических интерполянтов. В работе [3] рассмотрено применение указанного метода для численного решения дифференциальных уравнений с одной, двумя, тремя и четырьмя независимыми переменными в общем виде. Для каждого случая предложен вычислительный алгоритм решения. Авторами установлено, что при увеличении количества переменных вычислительный алгоритм остается неизменным, увеличивается лишь размерность геометрического интерполянта и количество уравнений по координатного расчета.

В работе [6] предложена математическая модель расчета балки при равномерно-распределенной нагрузке, выполненная путем аппроксимации численного решения дифференциальных уравнений методами геометрического моделирования [7]. Рассмотрено применение указанного метода для решения дифференциальных уравнений второго и четвертого порядков с одной независимой переменной. Для аппроксимации решения ДУ был выбран 1-параметрический геометрический интерполянт, который описывает кривую в  $R^2$ . В результате установлено совпадение с высокой степенью точности на уровне полиномиальных коэффициентов решений уравнений предложенным методом с точными решениями.

### Постановка задачи

Автором ставится задача исследовать точность аппроксимации решения уравнения Лапласа с различными граничными условиями с

помощью 2-парметрического геометрического интерполянта, описывающего поверхность в  $R^3$ .

**Основное изложение материала**

Для решения поставленной задачи рассмотрим краевую задачу первого рода для уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

на прямоугольнике с различными вариантами краевых условий.

Пример 1. Найти функцию двух переменных  $U = U(x, y)$  являющуюся решением уравнения Лапласа (1) в прямоугольнике  $0 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq 2$  и удовлетворяющую на его границах следующим условиям:

$$\begin{aligned} U(0, y) = U(2, y) = 0, \\ U(x, 0) = 0, \quad U(x, 2) = \sin \frac{\pi x}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

При решении краевых задач для уравнения Лапласа используются различные методы (метод разделения переменных, метод функции Грина, метод интегральных уравнений, вариационные методы, метод возмущений, современные методы компьютерной алгебры, численные методы и другие). В работе [8], используя метод разделения переменных (метод Фурье), найдено частное решение уравнения (1) с учетом граничных условий (2):

$$U(x, y) = \frac{1}{sh\pi} sh \frac{\pi y}{2} \sin \frac{\pi x}{2}. \quad (3)$$

Найдем решение краевой задачи (1)-(2) с помощью геометрического интерполянта.

Согласно [3] для аппроксимации решения рассматриваемого ДУ выбираем 2-парметрический геометрический интерполянт. Аналогично рассуждениям, приведенным в [9], определяем аппроксимирующую поверхность. Поскольку для решения дифференциальных уравнений второго порядка нужна дуга кривой как минимум 3-го порядка, автором рассматривается дуга кривой Безье 3-го порядка, которая однозначно определяется 4 точками. Это означает, что для определения образующей линии необходимо иметь 4 текущих точки, иначе – 4 направляющих линии. В случае, когда каждая из направляющих линий определяется 4 точками, получается отсек поверхности, проходящий через 16 наперед заданных точек. Следует отметить, что движение текущих точек направляющих линий согласовано одним параметром  $u$ , а движение текущей точки образующей линии определяется параметром  $v$ . Оба параметра изменяются в пределах от 0 до 1 [9].

Текущая точка поверхности отклика в трехмерном пространстве задается множеством исходных точек, которые рассматриваются на области прямоугольной формы. Для формирования регулярной сети точек точки по оси  $x$  и по оси  $y$  распределены равномерно в координатной плоскости  $Oxy$ . Это условие обеспечивает линейную зависимость между факторами влияния и параметрами множества точек  $u$  и  $v$ , необходимыми для определения функции отклика  $U$ .

На рис. 1 приведена геометрическая схема моделирования отсека поверхности, проходящей через 16 наперед заданных точек.

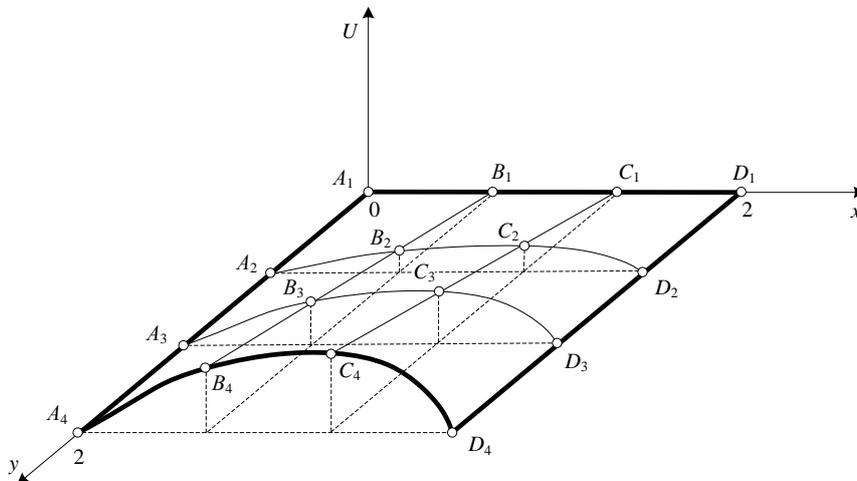


Рисунок 1 – Геометрическая схема моделирования отсека поверхности, проходящей через 16 наперед заданных точек

Каждая из направляющих линий определяется точками  $A_i, B_i, C_i, D_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) соответственно, а образующими являются линии  $A_i B_i C_i D_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ).

Вычислительный алгоритм моделирования 16-точечного отсека поверхности определяется следующей последовательностью точечных уравнений [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = A_1(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + A_2(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + A_3(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + A_4(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3), \\ B = B_1(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + B_2(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + B_3(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + B_4(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3), \\ C = C_1(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + C_2(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + C_3(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + C_4(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3), \\ D = D_1(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + D_2(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + D_3(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + D_4(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3), \\ M = A(\bar{v}^3 - 2,5\bar{v}^2v + \bar{v}v^2) + B(9\bar{v}^2v - 4,5\bar{v}v^2) + \\ + C(-4,5\bar{v}^2v + 9\bar{v}v^2) + D(\bar{v}^2v - 2,5\bar{v}v^2 + v^3). \end{array} \right. (4)$$

В БН-исчислении любой геометрический объект задаётся системой однотипных параметрических уравнений, которые представляют собой проекции текущей точки на оси глобальной системы координат. Следовательно, для перехода от точечных уравнений (4) к параметрическим, необходимо выполнить по координатный расчёт. Таким образом, первое из последовательности точечных уравнений (4) будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_A = x_{A_1}(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + x_{A_2}(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + x_{A_3}(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + x_{A_4}(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3); \\ y_A = y_{A_1}(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + y_{A_2}(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + y_{A_3}(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + y_{A_4}(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3); \\ z_A = z_{A_1}(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + z_{A_2}(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + \\ + z_{A_3}(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + z_{A_4}(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3). \end{array} \right.$$

Остальные точечные уравнения последовательности (4), включающие направляющие и образующие поверхности отклика, сводятся к параметрическим уравнениям аналогичным образом.

Следует заметить, что моделируемый отсек поверхности должен удовлетворять граничным условиям (2). Рассмотрим их подробно.

Условие  $U(0, y) = 0$  определяет фрагмент оси  $y$  при  $0 \leq y \leq 2$ , который проходит через точки  $A_1(0,0), A_2(0, \frac{2}{3}), A_3(0, \frac{4}{3}), A_4(0,2)$  (см.рис.1), значения функции отклика на котором равняются нулю:

$$U(0,0) = U(0, \frac{2}{3}) = U(0, \frac{4}{3}) = U(0,2) = 0.$$

Условие  $U(2, y) = 0$  представляет собой отрезок горизонтальной прямой  $x=2$  при  $0 \leq y \leq 2$ , который, как видим по рис.1, проходит через точки  $D_1(2,0), D_2(2, \frac{2}{3}), D_3(2, \frac{4}{3}), D_4(2,2)$ . На этом отрезке значения функции отклика равняются нулю:

$$U(2,0) = U(2, \frac{2}{3}) = U(2, \frac{4}{3}) = U(2,2) = 0.$$

Условие  $U(x,0) = 0$  определяет отрезок оси  $x$  при  $0 \leq x \leq 2$ , проходящий через точки  $A_1(0,0), B_1(\frac{2}{3},0), C_1(\frac{4}{3},0), D_1(2,0)$  (см.рис.1). Значения функции отклика на указанном участке оси  $x$  равняются нулю:

$$U(0,0) = U(\frac{2}{3},0) = U(\frac{4}{3},0) = U(2,0) = 0.$$

Условие  $U(x,2) = \sin \frac{\pi x}{2}$  при  $0 \leq x \leq 2$  представляет собой кривую, проходящую через точки  $A_4(0,2), B_4(\frac{2}{3},2), C_4(\frac{4}{3},2), D_4(2,2)$  (см. рис.1). Значения функции отклика в точках  $B_4$  и  $C_4$  (в точках  $A_4$  и  $D_4$  указаны выше) определяются следующим образом:

$$U(\frac{2}{3},2) = \sin \frac{\pi}{3}, U(\frac{4}{3},2) = \sin \frac{2\pi}{3}.$$

Как видим, 12 точек из 16-ти определяются граничными условиями по квадратному контуру.

Для аппроксимации решения уравнения Лапласа с учётом начальных и граничных условий необходимо будет определить ещё 4 точки таким образом, чтобы их координаты удовлетворяли краевой задаче (1)-(2). Отсюда следует, что система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) будет состоять всего из четырех уравнений:

$$\begin{cases} -9U_{B_2} + 2,25U_{B_3} + 2,25U_{C_2} = 0, \\ 2,25U_{B_2} - 9U_{B_3} + 2,25U_{C_3} + 1,9486 = 0, \\ 2,25U_{B_2} - 9U_{C_2} + 2,25U_{C_3} = 0, \\ 2,25U_{B_3} + 2,25U_{C_2} - 9U_{C_3} + 1,9486 = 0, \end{cases}$$

где  $U_{B_2}, U_{B_3}, U_{C_2}, U_{C_3}$  – значения функции отклика  $U$  в промежуточных точках  $\left(\frac{2}{3}, \frac{2}{3}\right), \left(\frac{2}{3}, \frac{4}{3}\right), \left(\frac{4}{3}, \frac{2}{3}\right), \left(\frac{4}{3}, \frac{4}{3}\right)$  соответственно.

Решив полученную СЛАУ, определим необходимые значения в узловых точках интерполянта. После чего подставим результат вычислений в уравнение аппроксимации. В результате уравнение аппроксимирующей поверхности будет иметь следующий вид:

$$U(x, y) = -0,137y^3x^2 + 0,274y^3x + 0,137y^2x^2 - 0,274y^2x - 0,213yx^2 + 0,426yx.$$

На рис. 2 с разных ракурсов представлены наложенные друг на друга поверхности, которые дают графическое представление решения уравнения Лапласа. Зеленым цветом показан эталонный отсек поверхности, полученный с помощью метода разделения переменных. Радужным цветом изображен отсек аппроксимирующей поверхности отклика, который проходит через 12 наперёд заданных точек, удовлетворяющих граничным условиям (2), и 4 точки, удовлетворяющие краевой задаче (1)-(2); при этом промежуточные значения найдены с помощью двумерной интерполяции.

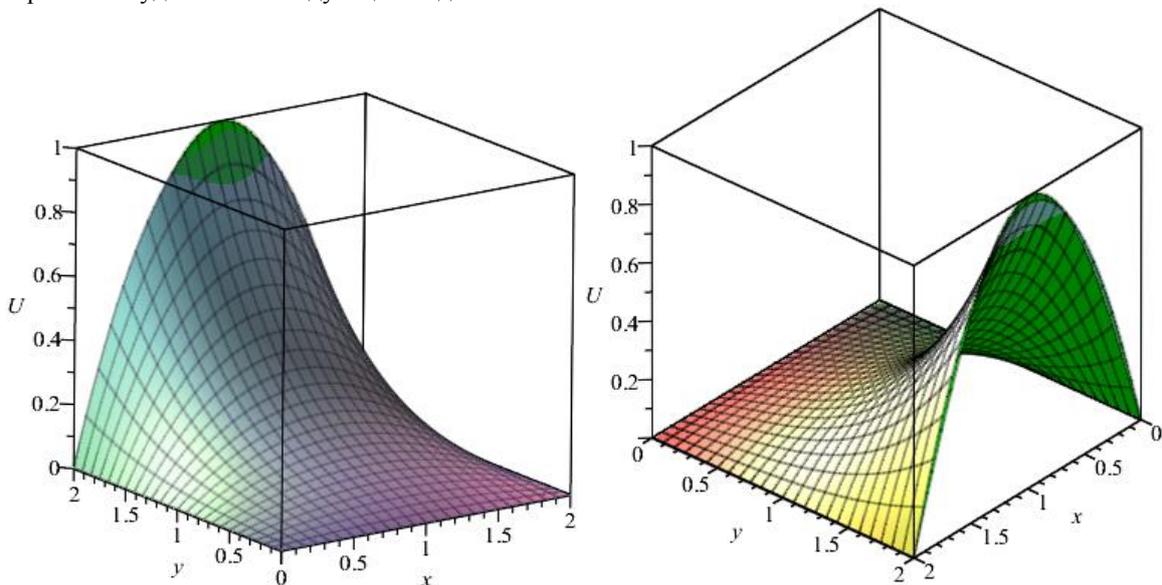


Рисунок 2 – Графическое сравнение результатов решения уравнения Лапласа с граничными условиями (2)

Как видно из представленного сравнения, аппроксимирующий 16-точечный отсек поверхности отклика с достаточно высокой точностью дублирует эталонный отсек поверхности, полученный с помощью метода разделения переменных.

**Пример 2.** Найти функцию двух переменных  $U = U(x, y)$ , являющуюся решением уравнения Лапласа (1) в прямоугольнике  $0 < x < 3, 0 < y < 5$  и удовлетворяющую на его границах следующим условиям:

$$\begin{aligned} U(0, y) &= 2 \sin \frac{\pi y}{5}, & U(3, y) &= 0, \\ U(x, 0) &= 4 \sin \frac{\pi x}{3}, & U(x, 5) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

В работе [11], используя метод разделения переменных (метод Фурье), приведено следующее частное решение уравнения с учетом граничных условий:

$$U(x, y) = \frac{4sh \frac{\pi(5-y)}{3}}{sh \frac{5\pi}{3}} \sin \frac{\pi x}{3} + \frac{2sh \frac{\pi(3-x)}{5}}{sh \frac{3\pi}{5}} \sin \frac{\pi y}{5}.$$

Для аппроксимации решения краевой задачи (1), (5) аналогично примеру 1 выбираем 2-параметрический геометрический интерполянт.

Так же как и в примере 1 двенадцать точек из 16-ти определяются граничными условиями по прямоугольному контуру. Для аппроксимации решения уравнения Лапласа с учётом начальных

и граничных условий необходимо будет определить ещё 4 точки таким образом, чтобы их координаты удовлетворяли краевой задаче (1), (5). Тогда СЛАУ также будет состоять из четырех уравнений. В результате уравнение аппроксимирующей поверхности принимает следующий вид:

$$U(x, y) = 0,030y^3x^2 - 0,090y^3x + 0,006y^2x^3 - 0,385y^2x^2 + 1,209y^2x - 0,312y^2 - 0,028yx^3 + 1,523yx^2 - 4,837yx - 1,732x^2 + 1,559y + 5,196x.$$

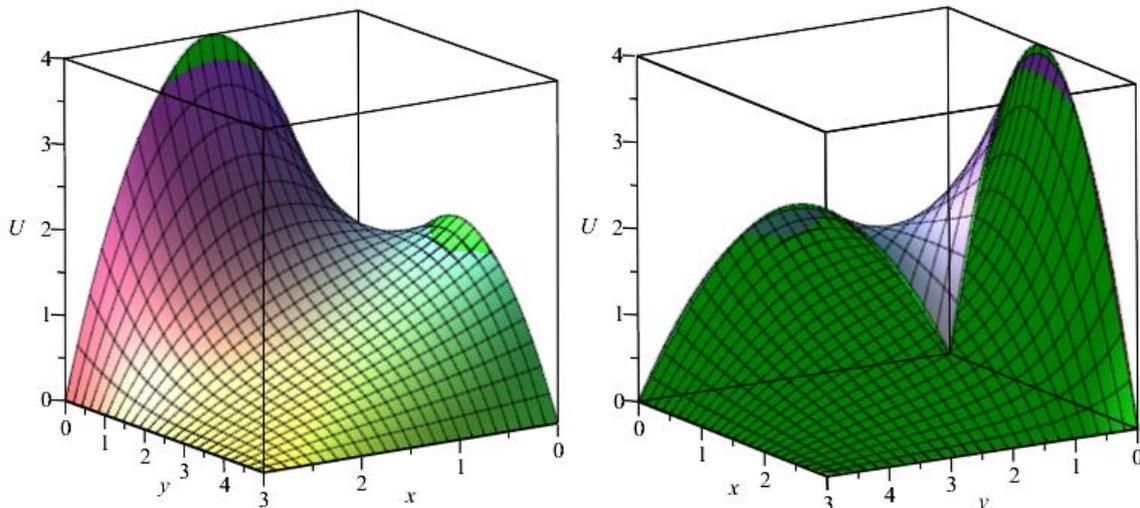


Рисунок 3 – Графическое сравнение результатов решения уравнения Лапласа с граничными условиями (5)

Как видно из представленного сравнения, с достаточно высокой точностью аппроксимирующий 16-точечный отсек поверхности отклика дублирует эталонный отсек поверхности, полученный с помощью метода разделения переменных.

### Выводы

В статье получил дальнейшее развитие геометрический подход к численному решению дифференциальных уравнений с частными производными. При этом выполнена аппроксимация численного решения дифференциальных уравнений методами геометрического моделирования на примерах решения уравнения Лапласа с различными граничными условиями. Сравнение полученных результатов с точными решениями демонстрирует высокую степень достоверности предложенного метода.

Перспективой дальнейших исследований является применение представленного метода аппроксимации для расчета напряжённо-деформированного состояния тонкостенных оболочек инженерных сооружений.

На рис. 3 с разных ракурсов представлены наложенные друг на друга поверхности, которые дают графическое представление решения уравнения Лапласа с заданными граничными условиями. Зеленым цветом показан эталонный отсек поверхности, полученный с помощью метода разделения переменных, а радужным – 16-точечный отсек аппроксимирующей поверхности отклика. Для 16-ти узловых точек выполняются условия краевой задачи (1), (5); при этом промежуточные значения найдены с помощью двумерной интерполяции.

### Литература

1. Бабич В.М., Капилевич М.Б., Михлин С.Г. и др. Линейные уравнения математической физики. М.: Наука, 1964. – 368 с.
2. Костецкая, Г.С. Уравнения математической физики эллиптического и параболического типов: учебное пособие / Г.С. Костецкая, Т.Н. Радченко; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 116 с.
3. Шевчук, О.А. Решение дифференциальных уравнений с помощью геометрических интерполянтов / О.А. Шевчук, Е.В. Конопацкий // Информационные технологии в проектировании и производстве. – М.: НТЦ «Компас», 2020. – № 3. – С.29-33.
4. Konopatskiy, E.V. Modeling geometric varieties with given differential characteristics and its application / E.V. Konopatskiy, A.A. Bezditnyi, O.A. Shevchuk // CEUR Workshop Proceedings, 2020. – Vol. 2744. – DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-31.
5. Конопацкий, Е.В. Использование геометрических интерполянтов для численного решения дифференциальных уравнений / Е.В.

Конопацкий, О.А. Шевчук // Информационные технологии: материалы 84-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3-15 февраля 2020 года. – Минск: БГТУ, 2020. – С.194-196.

6. Шевчук О. А. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния балки с распределенной нагрузкой [Текст] / О. А. Шевчук // Проблемы искусственного интеллекта. – 2021. – № 1 (20). – С. 63–72.

7. Конопацкий Е.В. Решение дифференциальных уравнений методами геометрического моделирования [Текст] / Е.В. Конопацкий // Труды 28-й Международной конференция по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon 2018». 24-27 сентября 2018 г. – Томск: ТПУ, 2018. – С. 322-325.

8. Задача с решением по уравнению с математической физики. Уравнение Лапласа в

прямоугольнике. Точка доступа: [https://www.matburo.ru/Examples/Files/umf\\_6.pdf](https://www.matburo.ru/Examples/Files/umf_6.pdf) (дата обращения: 08.03.2021).

9. Конопацкий Е.В. Моделирование аппроксимирующего 16-точечного отсека поверхности отклика, применительно к решению неоднородного уравнения теплопроводности // Геометрия и графика. – М.: Инфра-М, 2019. – Т.7. – №2. – С. 38-45. – DOI: 10.12737/article\_5d2c1a551a22c5.12136357.

10. Конопацкий Е.В. Моделирование дуг кривых, проходящих через наперед заданные точки [Текст] / Е.В. Конопацкий. – Вестник компьютерных и информационных технологий. – М.: 2019. – № 2. – С. 30-36. – DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.030-036.

11. Уравнения математической физики: Сборник примеров и упражнений / Сост. А.А. Рогов, Е.Е. Семенова, В.И. Чернецкий, Л.В. Щеголева. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. – 220с.

*Шевчук О. А. Использование геометрических интерполянтов для численного решения уравнения Лапласа в прямоугольнике. В статье рассматривается решение краевой задачи первого рода для уравнения Лапласа в прямоугольнике с различными граничными условиями. Исследовано применение геометрических интерполянтов для численного решения указанных задач. Сравнение полученных результатов с точными решениями демонстрирует высокую степень достоверности предложенного метода. Поскольку уравнения Лапласа моделируют реальные динамические процессы как в природе, так и в технических объектах, применение методов геометрического моделирования для их решения является актуальной научно-технической задачей.*

**Ключевые слова:** краевая задача, численное решение, дифференциальные уравнения

*Shevshuk O. Using geometric interpolants to numerically solve the Laplace equation in a rectangle. The article considers the solution of a boundary value problem of the first kind for the Laplace equations in a rectangle with various boundary conditions. The application of the geometric solution of these problems is investigated. The results obtained are compared with exact solutions of a high degree of reliability of the proposed method. The use of geometric modeling methods for solving the Laplace equation is an urgent scientific and technical problem, since these equations simulate real dynamic processes both in nature and in technical objects.*

**Keywords:** boundary value problem, numerical solution, differential equations

Статья поступила в редакцию 10.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

# **Инженерное образование**

## Control the complexity of the presentation of educational material in the classroom on the basis of a computer model of fuzzy sets

M. G. Koliada, T. I. Bugayova  
Donetsk National University, Donetsk  
kolyada\_mihail@mail.ru, bugaeva\_tatyana@mail.ru

### **Abstract**

*The purpose of this article is to demonstrate a computer implementation method of fuzzy set theory and fuzzy logic to control the complexity of presenting teaching material in class. Among the tasks that arise in this case, only one was singled out: the implementation of pedagogical modeling on the basis of the most powerful information system of fuzzy logic – Fuzzy Logic Toolbox (Mat Lab program). Approaches in formalization of statements of pedagogical orientation are shown. Examples related to the management of feeding difficulties learning material in class on the motivation and speed of learning new material. The results of the experiment on the influence of negative and positive motivation of students on the selection of the complexity of the educational material are presented. The forms of visualization of the analysis results in one-dimensional (graphics) and three-dimensional (surfaces) form are presented. These fuzzy inference surfaces allow you to determine the dependence of the values of the source variable on the values of the input variables of the fuzzy model. It is concluded that on the basis of the theory of fuzzy logic and fuzzy sets, it is possible to accurately and objectively perform calculations of the motivational component of learning and the rate of assimilation of new material from the position of its complexity. In this way, the teacher can guarantee to predict the results of future classes, which he prepares. The model, based on a computer system of fuzzy logic, allows the teacher to control the complexity of the presentation of the material in the classroom, which avoids subjectivity in the selection of the level of complexity of the educational material, and thus significantly improve the quality of training.*

### **Introduction**

In pedagogic in contrast to other fields of knowledge, teachers state their standpoint or analyze educational process in the form of judgments of fuzzy, and vague nature. The following statements, as: “better – worse” (e.g. material mastering), “enhanced – weakened” (e.g. preparation), “raised - lowered” (e.g. academic progress), “raised – lowered» (e.g. intellectual growth level) are involved in their speeches. When specifying characteristics and qualities of educational process elements, intermediate ranking is used: “enhanced a little”, “improved enough”, “weakened below average”, “implemented over the limit” etc. Such judgments are hard for formalization and particularly for determining strict and distinct summaries, interferences and conclusions.

In this specially developed concepts are used – these are the theory of fuzzy sets and the theory of fuzzy logic in software systems, among which the most powerful one is Fuzzy Logic Toolbox software package from matrix laboratory system “MatLab” by MathWorks.

Many thorough scientific researches deal with education management. For example, the works of Russian scientists consider issues of relevant information support for managing educational facilities. Among researches of a considered problem the most significant works are

by Y. A. Konarzhevskiy (2000), V. S. Lazarev (1995), V. S. Pikelnaya (1990), M. M. Potashnik (1997), E. N. Khrikov (2006).

In terms of this scientific inquiry important ones are the works by V. P. Bepal’ka (1989), V. A. Slastenin (1997), S. A. Smirnov (2000), which cover the problems of work optimization with institutional and administrative information, meeting information needs of pedagogical staff, building administrative culture of teachers etc.

A. G. Guralyuk (2008), D. V. Demidov (2009), G. A. Sukhovich (2008) considered In their researches the complexity management issues in delivering education material, but only at theoretical and methodological level. The development process is following the way of integrating pedagogical researches and discoveries in the field of the exact sciences. In mathematics there are significant practices in terms of formalizing social and educational mechanisms implemented in analysis/decision-making computer systems. However the problem of managing the complexity of teaching material presentation is still insufficiently researched both in theoretical and in practical aspects. Such an important question as consideration of fuzzy model computer implementation for managing the complexity of teaching material presentation at lessons has left

overlooked for now.

At the same time, regarding the practical importance managing the complexity of teaching material presentation for high quality education results, absence of a theoretical basis and practical use of such system in educational facilities, the article heading has been selected: «*Managing the complexity of teaching material presentation using a fuzzy set model*».

For school teachers, lecturers, department heads and deans of higher education institutions this research area is very interesting, and its development becomes not only a theoretical and methodological basis for improvement of educational measurements and scientometrics, but also for practical use in education processes management.

**Article purpose** – to demonstrate a computer realization of fuzzy set theory and fuzzy logic theory for managing complexity of teaching material presentation at lessons.

Among **tasks** which arise herewith, only one has been determined: the implementation of pedagogical modeling on the basis of the most powerful up-to-date information system of fuzzy logic – Fuzzy Logic Toolbox (through matrix laboratory software package Mat Lab, ver. R2013a).

### **Management of complexity of giving of a teaching material on employment by means of the program of fuzzy logic toolbox**

On the basis of concepts presented by fuzzy sets, there is a possibility to interpret human judgments which can be used further for modeling and forecasting of administrative education processes.

In pedagogic, as a rule, the easiest way for a teacher or a pupil (student) to outline some processes or phenomena of teaching and educational validity at the level of verbal descriptions, i.e. – in non-formalized form (Morze, 2013). It is more convenient to use qualitative fuzzy estimations, like “much”, “a little”, “high enough”, “too far”, “very close”, “quickly”, “too slowly”, “average (e.g. preparation)”, “too weak” etc.

Let's admit that  $X = \{Cambridge\ university, Stanford\ university, Moscow\ State\ University, National\ University\ of\ Kyiv\}$  – is a set of various world's top-rank universities. Then the fuzzy set  $A = \text{“Excellent university”}$  can be defined as follows:

$$A = \{(Cambridge / 1), (Stanford / 0.8), (MSU / 0.3), (NUK / 0.1)\},$$

where the figures standing near names express the degree of reflection (approximation) of a definition “Excellent university”.

It is clear that the membership function for each fuzzy set is generally defined in a subjective

way. For the example above the member function form for a fuzzy set reflects an estimation variant of “F1 Study, 2010” independent reference book, which can be a agreed not by everyone.

Despite vague limits of a fuzzy set  $A$ , it can be precisely defined with a comparison to each element of  $x$ -number standing between 0 and 1, representing its membership in  $A$ .

For example, membership function of an “external conflict” concept (a conflict out of itself) will be written in the language of the fuzzy sets theory as follows:

$$External\ conflict = \{20/0.01 + 20/0.9 + 20/0.5 + 10/0.5 + 10/0.2 + 10/0.1\},$$

here the “+” sign is not a symbol for addition but for unification;

number 20 means a conflict tendency level among people with expressed *extraversion*;

number 10 – a conflict tendency level among people with expressed *introversion*.

Any of these values *Extroverts-Introverts* values have a correspondent proximity index, for example, according to the behavior style of these individuals in external conflicts (according to the classification of an American psychologist R. Thomas). For *cooperation* this value is 0.01, for *rivalry* – 0.9, for *compromise* – 0.5, for *adaptation* – 0.2 and for *conflict avoidance* – 0.1. From the listed styles only one – cooperation, is active and effective in terms of defining result of a conflict situation. The most conflict-oriented is the second active style – rivalry (proximity index – 0.9); avoidance and adaptation are characterized by the passive form of behavior, therefore the proximity index is smaller (0.1 and 0.2). Compromise occupies an intermediate position, combining both active, and passive reaction forms (it has 0.5 index).

If to consider new judgments in relation to the basic concept - “conflict”, then they can be defined in fuzzy sets theories as follows:

$$Incident = conflict^2 \text{ (squared conflict);}$$

$$Challenge = conflict^3 \text{ (cubed conflict);}$$

$$Escalation = conflict^4 \text{ (the conflict in the fourth degree).}$$

In the theory of fuzzy sets membership function plays a key role as it is the basic characteristic of fuzzy object, and all actions with fuzzy objects are made through operations with their functions of an accessory. Definition of function of an accessory is the first and very important stage of modeling allowing then to operate with fuzzy objects.

There are no strict rules which could be used for a choice of corresponding membership function, as well as there are no methods of an estimation of appropriateness and correctness of membership

functions put forward in various ways. The methods used for constructing a membership function, should be flexible enough so that they could be rearranged easily for action optimization of algorithms, which are using these membership functions. The problem of choosing a membership function is also essential, as the efficiency of many algorithms depends on the form of used membership function.

Due to the fact that between elements, which are members of any set or are independent, there can be no sharp edge, we often cannot give a definite answer to a question on value of a membership function in limits of traditional formal logic. The professor of the University of California Lotfi A. Zadeh in 1965 developed the basics of the fuzzy sets theory; he also offered an exit from this uneasy situation.

*Linguistic variable* – is a variable which accepts value from a set of words or word combinations of some natural or artificial language. The linguistic variable can be defined as a variable, the values of which are not numbers, but words or sentences in the natural language used in verbal human dialogue. For example, the linguistic variable “proficiency” can accept following values: “very weak”, “weak”, “above average”, “average”, “below average”, “high”, “very high”, etc. These values, which display degree of expressiveness of a variable, are called in the fuzzy sets theory as *terms* (a term – to name). It is clear that the variable “proficiency” will be a usual variable, if its values are exact numbers, and it becomes a linguistic variable as it is used in fuzzy judgments. Each value of a linguistic variable corresponds to a certain fuzzy set with its membership function. So, the linguistic value “*Excellent university*” can correspond to a membership function of some mathematical dependence, and the terms of the linguistic value can be expressed as follows: *highly excellent university, excellent university, excellent university of average type, not absolutely excellent university* etc.

Let's consider an example connected with managing the complexity of teaching material presentation according to motivation and speed of mastering new material by students.

In this case empirical knowledge of the considered pedagogical problem can be presented in the form of heuristic rules, which are developed by a skilled teacher intuitively and internally for the case of taking an administrative decision.

The knowledge base can have such appearance:

1. If *Motivation of training is Very positive*, and *Speed of mastering of a new material is High*, it is necessary to give (use) a material of *Very high complexity*.

2. If *Motivation of training is Very positive*, and *Speed of mastering of a new material is Low* it is necessary to give a material of *Above average*

*complexity*.

3. If *Motivation of training is Positive*, and *Speed of mastering of a new material is High* it is necessary to give a material of *High complexity*.

4. If *Motivation of training is Positive*, and *Speed of mastering of a new material is Low* it is necessary to give a material of *Average complexity*.

5. If *Motivation of training is Very negative*, and *Speed of mastering of a new material is Low* it is necessary to give a material of *Very low complexity*.

6. If *Motivation of training is Very negative*, and *Speed of mastering of a new material is High* it is necessary to give a material of *Below average complexity*.

7. If *Motivation of training is Negative*, and *Speed of mastering of a new material is Low* it is necessary to give a material of *Low complexity*.

8. If *Motivation of training is Negative*, and *Speed of mastering of a new material is High* it is necessary to give a material of *Average complexity*.

9. If *Motivation of training is Very positive*, and *Speed of mastering of a new material is Average* it is necessary to give a material of *High complexity*.

10. If *Motivation of training is Positive*, and *Speed of mastering of a new material is Average* it is necessary to give a material of *Above average complexity*.

11. If *Motivation of training is Very negative*, and *Speed of mastering of a new material is Average* it is necessary to give a material of *Low complexity*.

12. If *Motivation of training is Negative*, and *Speed of mastering of a new material is Average* it is necessary to give a material of *Below average complexity*.

13. If *Motivation of training is Standard* (within normal limits), and *Speed of mastering of a new material is High* it is necessary to give a material of *Above average complexity*.

14. If *Motivation of training is Standard*, and *Speed of mastering of a new material is Low* it is necessary to give a material *Below average complexity*.

15. If *Motivation of training is Standard*, and *Speed of mastering of a new material is Average* it is necessary to give a material of *Average complexity*.

This information will be used at construction of base for rules of fuzzy interference system, which will allow to realize the given fuzzy model management.

Let's remind that *motives* are internal forces connected with personal needs, and engagement to educational activity; in other words, *motives* – *are intended, acknowledged and experienced needs, particularly an interest for educational work, cognitive activity and a considered lesson topic* etc. Motivation is measured in relative values, for

example, in per cents (from 0 % to 100 %).

In pedagogic the *reason* is generally identified with such concepts, as influence, action, influence indicator and parameter. One factor is defined according to at least two or more product development reasons of the same membership groups (for example, general or specific one).

If to consider the “training motivation” didactic factor as a management system of complexity of teaching material presentation it is necessary know that this concept has a complex internal structure. The motivation of training can be *positive* and *negative*. As an example we will show product development reasons of some of such motivations (Podlasyj, 2002; p. 338):

- Reason impulse (positive – “I want” and “I can”; negative – “I must” and “I shall”);
- Duration (accordingly: significant – insignificant);
- Inevitability (weak – strong);
- Cognitive organization (deliberate – mechanical);
- Intellectual flexibility (easiness of transition from some intellectual actions to other – rigidness thinking);
- Rate (heated – sluggish);
- Purpose characteristic (attractive – unpleasant);
- Emotional coloring (satisfaction – depression);
- Imagination intensity (considerable – insignificant) etc.

*Speed of mastering of a new material* is time for mastering of Information and meaning elements of a text (IMET) per time unit, and *complexity (difficulty) of a material* is degree of its mastering. During the lesson 0 to 15 IMET can be perceived, therefore the range of definition of this value will fluctuate in different scales. The material complexity can be measured in different scales. For convenience of the task solution, we will choose a 7-point scale which conform with seven terms below (from 1 to 7).

To form a rule base for a fuzzy interference system it is necessary to define preliminary input and output linguistic variables. From the statements above it is clear that as one of input variables it is necessary to use training motivation:  $x_1$  – “*Training motivation*”, the second linguistic variable is  $x_2$  – “*Speed of mastering*». As an output linguistic variable a managing value of complexity of teaching material presentation will be used:  $y$  – “*Material complexity*”.

To reduce rules recording we will use standard MatLab symbols. As terms the following is used:

For what should be *given as a teaching material*:

- Very high complexity* – PB (positive big);
- High complexity* – PM (positive medium);

- Above average complexity* – PS (positive small);
- Average complexity* – ZE (zero);
- Below average complexity* – NS (negative small);
- Low complexity* – NM (negative medium);
- Very low complexity* – NB (negative big).

For *training motivation*:

- Very positive* – PB;
- Positive* – PS;
- Standard* – ZE;
- Negative* – NS;
- Very negative* – NB.

For *speed of mastering of a new material*:

- High* – PM;
- Average* – ZE;
- Low* – NM.

Thus, we have executed the *fuzzyfication* of input variables.

For our case the fuzzy interference system will contain 15 rules of the fuzzy knowledge database as follows:

1. **IF** « $x_1$  is PB» **AND** « $x_2$  there is PM» **THAT** « $y$  is PB»
2. **IF** « $x_1$  is PB» **AND** « $x_2$  there is NM» **THAT** « $y$  is PS»
3. **IF** « $x_1$  is PS» **AND** « $x_2$  there is PM» **THAT** « $y$  is PM»
4. **IF** « $x_1$  is PS» **AND** « $x_2$  there is NM» **THAT** « $y$  is ZE»
5. **IF** « $x_1$  is NB» **AND** « $x_2$  there is NM» **THAT** « $y$  is NB»
6. **IF** « $x_1$  is NS» **AND** « $x_2$  there is PM» **THAT** « $y$  is NS»
7. **IF** « $x_1$  is NS» **AND** « $x_2$  there is NM» **THAT** « $y$  is NM»
8. **IF** « $x_1$  is NS» **AND** « $x_2$  there is PM» **THAT** « $y$  is ZE»
9. **IF** « $x_1$  is PB» **AND** « $x_2$  there is ZE» **THAT** « $y$  is PM»
10. **IF** « $x_1$  is PS» **AND** « $x_2$  there is ZE» **THAT** « $y$  is PS»
11. **IF** « $x_1$  is NB» **AND** « $x_2$  there is ZE» **THAT** « $y$  is NM»
12. **IF** « $x_1$  is NS» **AND** « $x_2$  there is ZE» **THAT** « $y$  is NS»
13. **IF** « $x_1$  is ZE» **AND** « $x_2$  there is PM» **THAT** « $y$  is PS»
14. **IF** « $x_1$  is ZE» **AND** « $x_2$  there is NM» **THAT** « $y$  is NS»
15. **IF** « $x_1$  is ZE» **AND** « $x_2$  there is ZE» **THAT** « $y$  is ZE»

Let's open the FiS-editor and define 2 input variables with names  $x_1$ ="Motivation\_\_training" and  $x_2$ ="Speed\_\_mastering" and one output variable with a name  $y$ ="Complexity\_\_material". Through *File* → *Export* → *To File* we save the fuzzy system file under name Complexity1.fis. The screenshot of FiS-editor graphic interface for these variables is shown in Figure 1.

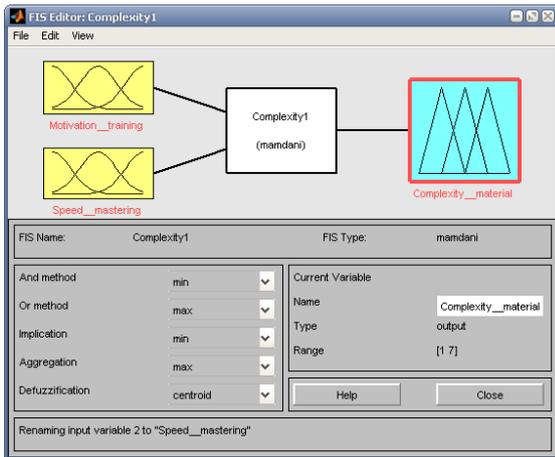


Figure 1 - The main screen of the FIS-editor for two input variables

Solving this issue we will use a fuzzy inference algorithm of Mamdani type, therefore we will leave the MatLab default type unchanged. There is no necessity to change other parameters of a developed fuzzy model set by default in Fuzzy Logic Toolbox.

Let us define functions of membership terms for each variable of a fuzzy inference variable. For this purpose we will use system membership functions editor Fuzzy Logic Toolbox.

For an input variable  $x_1$  it is necessary to add two more additional terms to already available three ones, which are set by default, and it is necessary to define parameters of corresponding membership functions (*Edit* → *Add MFs*). Graphic interface layout of the membership functions editor after entering the first input variable is represented in Figure 2.

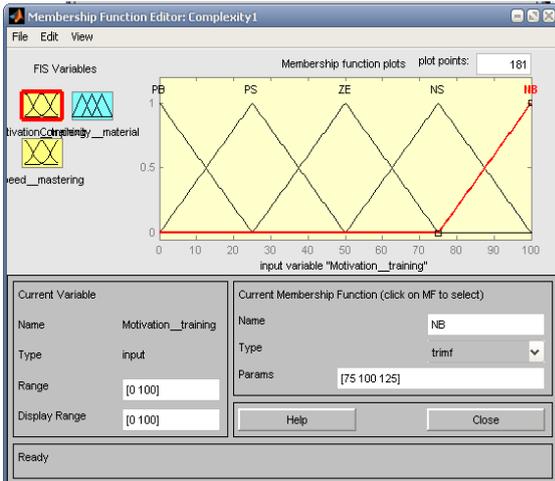


Figure 2: - Membership functions editor screen “Motivation\_\_training” after filling its action range and terms names

For the second input variable  $x_2$  it is necessary to leave 3 default terms and to change only membership functions type and parameters. For an input variable  $y$  it is necessary to add 4 terms to 3 default ones, and to set parameters of corresponding membership functions. Graphic interface layout of the membership functions editor after entering an output variable is represented in Figure 3.

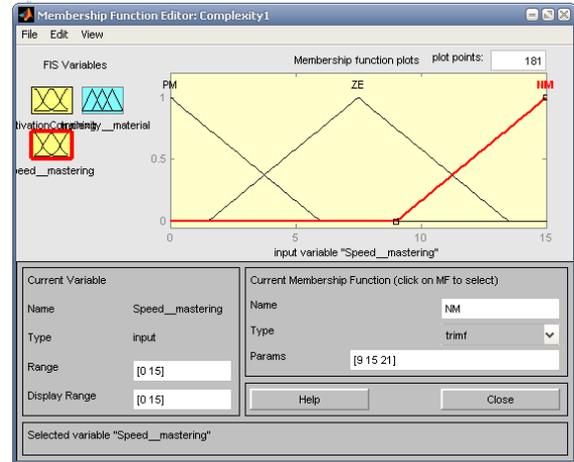


Figure 3 - Membership functions editor screen “Speed\_\_mastering” after filling its action range and terms names

In the same way we will edit parameters of entering values for output membership function “Complexity\_\_material”. The screen layout the rules editor for output function is presented in Figure 4.

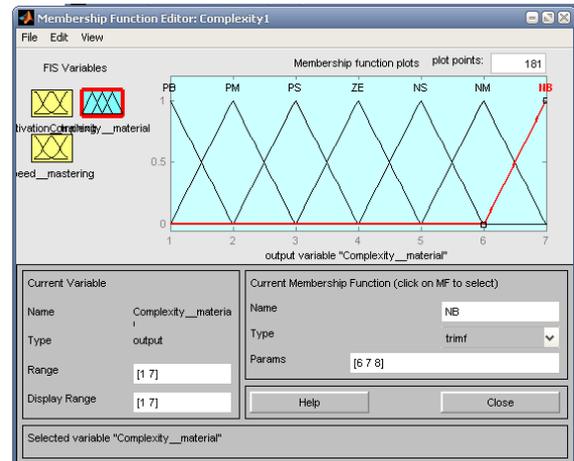


Figure 4 -The graphic interface of the membership function editor “Complexity material” after filling parameters of the fuzzy inference system

Now we will set 15 rules for a developed fuzzy inference system. For this purpose we will use the Fuzzy Logic Toolbox rules editor (*Edit* → *Rules*). The graphic interface layout of the editor after entering all 15 fuzzy inference rules is represented in Figure 5.

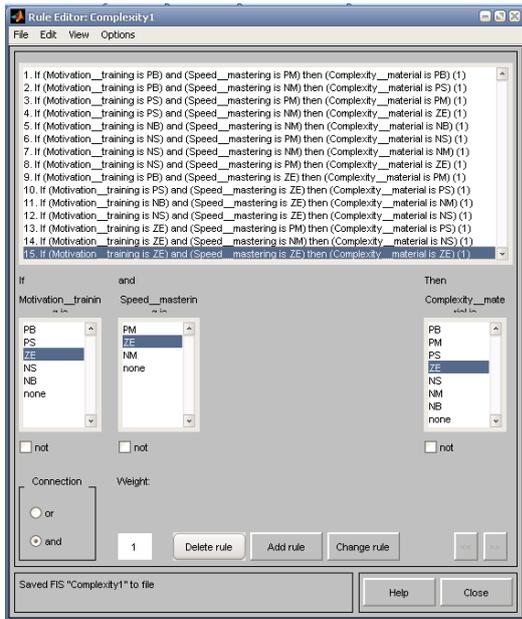


Figure 5 - The graphic interface of the editor after entering the knowledge database of the fuzzy inference system

To provide fine adjustment of the fuzzy model constructed by us, it is possible to enter other parameters, but for this purpose it is necessary to know definitely the membership function type.

Now let us open the viewer of fuzzy logic system rules (*View* → *Rules*) and look at the calculated result (Figure 6).

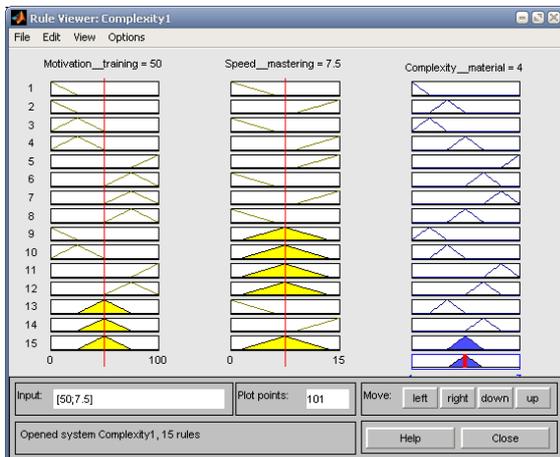


Figure 6 - Visualization of the fuzzy logic system to determine material complexity in Rule Viewer

And now we will perform an experiment, for this purpose we will enter values of input variables for a particular case when the motivation of training is negative (NS) and is 25 % (on a 100-point scale), and speed of mastering of a teaching material is average (ZE) and makes 7 IMET/lesson (on a 15-point scale). After performing the fuzzy inference procedure for our model, the system will return a result of an output variable according

to the material complexity of 3 points (on a 7-point scale). That means that under such input parameters the teacher should select (and use) a material of below average complexity (NS) during the lesson presentation (Figure 7).

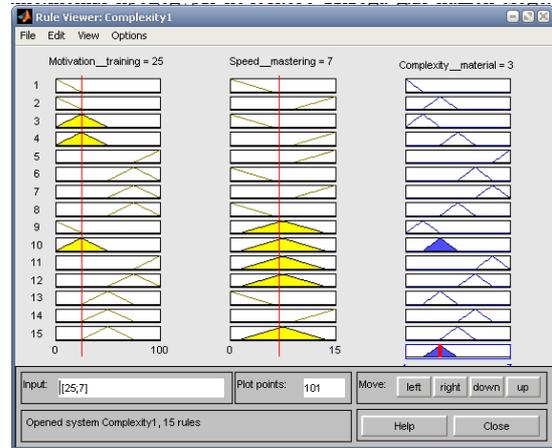


Figure 7 - Prognostic experiment: *Motivation\_training* value – negative (25 %), *Speed\_mastery* – average (7 IMET/lesson)

This value shows a good consistency of the model and submits its correspondence to current pedagogic reality.

And what will happen, if the motivation of training of students is absolutely absent (0 %), but, at the same time speed of mastering of a material will make the maximum size (that is 15 IMET/lesson)? What complexity of a material should be set for a lesson then? To these questions the fuzzy logic system gives the exact answer: complexity degree of 3 points (on a 7-point scale) (Figure 8). As we see it is the same complexity, as well as in the previous case, and here emerges a new question.

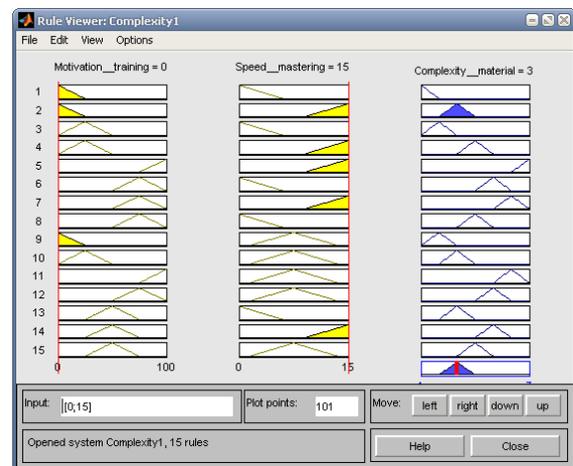


Figure 8 - Prognostic experiment: *Motivation\_training* value - zero (i.e. it is absent – 0 %), *Speed\_mastery* – high (15 IMET/lesson)

What is the reason for equal results under absence of motivation? In our opinion it is possible only when the teacher uses active methods of training during the lesson, that means such actions leading to a productive result. Certainly, here there is nothing to do without modern educational technologies.

As we see, such modeling on the basis of computer fuzzy logic system provides a magnificent result of a pedagogical forecast.

Sometimes for the general analysis of a developed expert prognostic system a visualization of a corresponding fuzzy interference surface (*View* → *Surface*) can be useful as well (Figure 9).

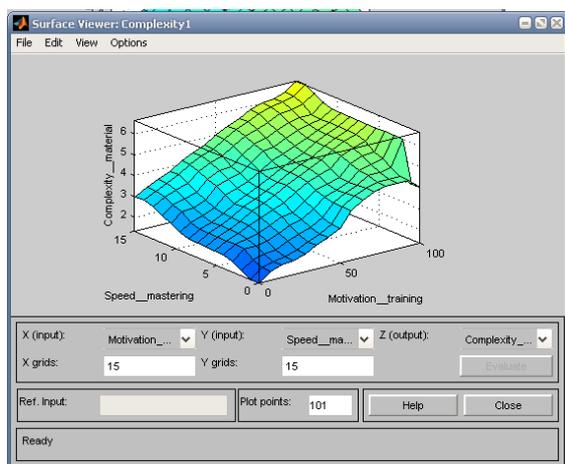


Figure 9 - Visualization of a fuzzy interference surface for material complexity

This surface allows to establish dependence of initial variable values on values of input variables of a fuzzy model of material complexity control system. This dependence can form a basis for specific recommendations for those, who conducts lesson.

In fact, we have scientifically solved the problem which in the classical theory of education management is known as a *problem of synthesis of control actions*. Thus for its decision computer means of fuzzy logic and the fuzzy sets *synthesis of operating influences* have been used.

It is sometimes very convenient to use one-dimensional diagram of dependences. For example, changing names of variables in entry fields (*X(input)* and *Y(input)*), it is possible to set one-dimensional dependence of *Complexity\_\_material* on *Speed\_\_mastering*.

Figure 10 represents an indicator of speed mastering continuing to increase somewhere in the middle of the diagram, but the material presentation complexity remains for some time constant ( $\approx$  at 4 points level); it is also observed both in the beginning, and in the end of this process.

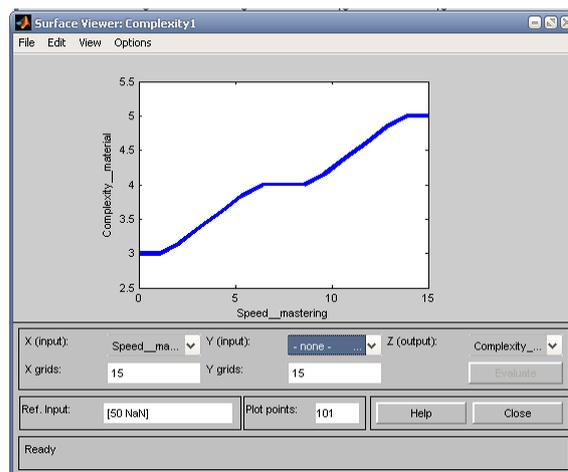


Figure 10 - Visualization of one-dimensional dependence of “Complexity\_\_material” on “Speed\_\_mastering”

## Conclusion

Finishing the description of a computer way of managing the complexity of teaching material presentation and regarding received results, we conclude that on the basis of the fuzzy logic theory and fuzzy sets theory it is possible to carry out objective and precise calculations of a motivational component of training and speed of mastering a new material in terms of its complexity. In such a way the teacher can reliably predict the result of the future prepared lesson. Management of teaching material complexity is one of conditions for increasing lesson efficiency and for improving quantitative methods in pedagogic being an information process. In its turn it is a a component of a new branch of human knowledge –education management scientometrics. The model based on computer fuzzy logic system gives an opportunity to measure material complexity when giving it at lessons. It allows to avoid subjectivity in selection of teaching material complexity level for the lesson, and, as a result, to increase essentially the education level.

Integrating educational and information technologies is a time-bound process and so far it is impossible to draw the line between achievements in education management on the one hand and achievements in mathematics and computer technologies in taking effective pedagogical decisions on the other.

## References

1. Bepal'ka, V. P. Century of the Item Composed pedagogical technology. - Moscow, USSR: Pedagogic, 1989. - 192 p.
2. Sergeeva, V. P. (2001) *Management educational systems: the Program-method the grant*, Moscow, Russian Federation, 160 p.
3. Konarzhevskiy, Y. A., *Intraschool management*. - Moscow, Russian Federation: the

Center "Ped. Search", 2000. - 224 p.

4. Pikel'naya, V. S. Theoretical bases of management (school aspect): the Method, the grant. – Moscow, USSR: "The higher school", 1990. - 175 p.

5. Potashnik, M. M. Management modern school (In questions and answers) / M. M. Potashnik, A. M. Moiseyev. - Moscow, Russian Federation: "New school", 1997. - 352 p.

6. Khrikov, E. N. Management of educational institution: The manual, Kiev, Ukraine: "Knowledge", 2006. - 365 p.

7. Slastenin, V. A. Pedagogic : innovative activity / V. A. Slastenin, L. S. Pozimova. - Moscow, Russian Federation: "The Master", 1997. - 224 p.

8. Pedagogic / Under edition S. A. Smirnov, Moscow, Russian Federation: Publishing centre "Academy", 2000. - 512 p.

9. A management of pedagogical collective: models and methods / the Grant for heads of educational institutions // Under the editorship of V. S. Lazarev. – Moscow, Russian Federation: The centre of social and economic researches, 1995. - 158 p.

10. Guralyuk, A. G. Management of establishment after the degree pedagogical

education with application of computer technologies : The dissertation author's abstract on competition of scientific degree of the candidate of pedagogical sciences, Kiev, Ukraine, 2008. - 24 p.

11. Sukhovich, G. A. Monitoring of development of general educational institution on the basis of computer technologies: The dissertation on competition of scientific degree of the candidate of pedagogical sciences, Kiev, Ukraine, 2008. - 196 p.

12. Demidov, D. V. Modeling of technology of the organization of educational process at pedagogical universities: The dissertation on competition of scientific degree of the candidate of pedagogical sciences, Lugansk, Ukraine, 2009. - - 260 p.

13. Morze, N. V. Creation of information educational space of region as the catalyst of formation IK-kompetensy of teachers // Educational Technology and Society, 2013. - N16 (1). - PP. 787–799. - URL: <http://ifets.ieee.org/russian/periodical/journal.html>

14. Podlasyj, I. P. Pedagogic. A new course : studies. in 2 books, Kn. 1. - Moscow: Russian Federation: "VLADOS", 2002. - 576 p.

**Коляда М.Г., Бугаева Т.И. Управление сложностью подачи учебного материала на занятии на основе компьютерной модели нечетких множеств.** Цель статьи – наглядно показать компьютерный способ реализации теории нечетких множеств и теории нечеткой логики для управления сложностью подачи учебного материала на занятии. Среди задач, которые возникают при этом, была выделена лишь одна: реализация педагогического моделирования на основе самой мощной на сегодняшний день информационной системы нечеткой логики – Fuzzy Logic Toolbox (программы Mat Lab). Показаны подходы в формализации высказываний педагогической направленности. Рассмотрены примеры, связанные с управлением подачей сложности учебного материала на занятии относительно учета мотивации и скорости усвоения нового материала. Приведены результаты экспериментов относительно влияния отрицательной и положительной мотивации обучающихся на подбор сложности учебного материала. Представлены формы визуализации результатов анализа в одномерном (графики) и объемном (поверхности) виде. Эти поверхности нечеткого вывода позволяют установить зависимость значений исходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели. Сделан вывод, что на основе теории нечеткой логики и нечетких множеств можно достаточно точно и объективно выполнять расчеты мотивационной составляющей обучения и скорости усвоения нового материала с позиции его сложности. Таким способом преподаватель может гарантированно прогнозировать результаты будущего занятия, которое он готовит. Модель, основанная на компьютерной системе нечеткой логики, дает возможность преподавателю дозированно управлять сложностью подачи материала на занятии, что позволяет избежать субъективизма в подборе уровня сложности учебного материала, и тем самым существенно повысить качество обучения.

**Ключевые слова.** Педагогическое прогнозирование, эффективное обучение, управление сложностью материала, компьютерная модель нечетких множеств, наукометрия, формализация человеческих высказываний.

**Коляда М.Г., Бугайова Т.І. Управління складністю подачі навчального матеріалу на занятті на основі комп'ютерної моделі нечітких множин.** Ціль статті – наочно показати комп'ютерний спосіб реалізації теорії нечітких множин і теорії нечіткої логіки для управління складністю подачі навчального матеріалу на занятті. Серед задач, що виникають при цьому, була виділена лише одна: реалізація педагогічного моделювання на

основі самої могутньої на сьогоднішній день інформаційної системи нечіткої логіки – Fuzzy Logic Toolbox (програми Mat Lab). Показано підходи у формалізації висловлень педагогічної спрямованості. Розглянуто приклади, пов'язані з управлінням подачею складності навчального матеріалу на занятті щодо врахування мотивації і швидкості засвоєння нового матеріалу. Приведено результати експерименту щодо впливу негативної і позитивної мотивації тих, хто навчається, на підбор складності навчального матеріалу. Представлено форми візуалізації результатів аналізу в одомірному (графіки) і об'ємному (поверхні) вигляді. Ці поверхні нечіткого висновку дозволяють установити залежність значень вихідної змінної від значень вхідних змінних нечіткої моделі. Зроблено висновок, що на основі теорії нечіткої логіки і нечітких множин можна досить точно й об'єктивно виконувати розрахунки мотиваційної складової навчання і швидкості засвоєння нового матеріалу з позиції його складності. Таким способом викладач може гарантовано прогнозувати результати майбутнього заняття, яке він готує. Модель, заснована на комп'ютерній системі нечіткої логіки, дає можливість викладачу дозволано керувати складністю подачі матеріалу на занятті, що дозволяє уникнути суб'єктивізму в підборі рівня складності навчального матеріалу, і тим самим істотно підвищити якість навчання.

*Ключові слова.* Педагогічне прогнозування, ефективне навчання, управління складністю матеріалу, комп'ютерна модель нечітких множин, наукометрія, формалізація людських висловлень.

**Koliada M.G., Bugayova T.I. Control the complexity of the presentation of educational material in the classroom on the basis of a computer model of fuzzy sets.** The purpose of this article is to demonstrate a computer implementation method of fuzzy set theory and fuzzy logic to control the complexity of presenting teaching material in class. Among the tasks that arise in this case, only one was singled out: the implementation of pedagogical modeling on the basis of the most powerful information system of fuzzy logic – Fuzzy Logic Toolbox (Mat Lab program). Approaches in formalization of statements of pedagogical orientation are shown. Examples related to the management of feeding difficulties learning material in class on the motivation and speed of learning new material. The results of the experiment on the influence of negative and positive motivation of students on the selection of the complexity of the educational material are presented. The forms of visualization of the analysis results in one-dimensional (graphics) and three-dimensional (surfaces) form are presented. These fuzzy inference surfaces allow you to determine the dependence of the values of the source variable on the values of the input variables of the fuzzy model. It is concluded that on the basis of the theory of fuzzy logic and fuzzy sets, it is possible to accurately and objectively perform calculations of the motivational component of learning and the rate of assimilation of new material from the position of its complexity. In this way, the teacher can guarantee to predict the results of future classes, which he prepares. The model, based on a computer system of fuzzy logic, allows the teacher to control the complexity of the presentation of the material in the classroom, which avoids subjectivity in the selection of the level of complexity of the educational material, and thus significantly improve the quality of training.

**Keywords:** Pedagogical Forecasting, Effective Training, Managing material complexity, Computer model of indistinct sets, Scientometrics, Formalization of human statements.

Статья поступила в редакцию 20.12.2019  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

УДК 004.03:023

## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕСУРСНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БИБЛИОТЕКИ ВУЗА

Е. И. Приходченко, О. В. Кулькова  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

e-mail: [88rapoport88@mail.ru](mailto:88rapoport88@mail.ru) ; [olga.kulkova.2016@mail.ru](mailto:olga.kulkova.2016@mail.ru)

### **Аннотация**

*В статье рассмотрен материал по информатизации библиотек, что является необходимым условием для обеспечения населения современными библиотечными услугами. Информатизация – это средство обеспечения привлекательности и комфортности библиотеки. Чтобы стать более необходимыми своим читателям, нужно активно использовать технологические изменения, которые произошли за последние годы в библиотеках. Без использования всех образовательных возможностей, которые предоставляют нам современные информационные технологии, нельзя подготовить специалиста, квалификация которого соответствовала бы быстро меняющимся реалиям жизни. Новые информационные технологии в практике работы библиотеки, доступ к Интернету значительно повысили статус вузовской библиотеки. Наряду с печатными изданиями в библиотеку поступают издания в электронной форме, а доступ к ним позволяет оперативно и наиболее полно организовать получение информации.*

### **Введение**

Создание нового научного направления в виде методов и средств сначала в кибернетике, а затем и в информатике, существенно изменило образ мира. Развитие информационного общества затрагивает все сферы человеческой деятельности — от досуговой до профессиональной. Процесс информатизации полным ходом идет и в образовательных учреждениях. Внедрение новых информационных технологий во все сферы человеческой деятельности, увеличение объемов структурированной и неструктурированной информации изменяют мировое информационное пространство. Интенсивно развивающиеся информационные технологии, вхождение интернета во все сферы общественной жизни привели к коренным изменениям в библиотечной деятельности. Изменения — характерная особенность сегодняшнего существования библиотек.

Современный подход к подготовке высококвалифицированных специалистов не ограничивается только овладением необходимыми знаниями и навыками. Он предусматривает работу по формированию личности будущего специалиста как человека с активной жизненной позицией, целеустремленного, способного реализовать себя в информационном мире. Поэтому одно из основных направлений деятельности университета — это внедрение в учебный

процесс современных информационных технологий, чему способствует деятельность научно-технической библиотеки ДОННТУ.

Сегодня формируется новый образ вузовской библиотеки. На создание этого образа влияют те возможности, которые возникли с появлением и развитием новых технологий. Безусловно, остается неизменным ее основное функциональное назначение, т. е. информационное обеспечение и поддержка учебного, воспитательного и исследовательского процессов. Но очевидно, что перед библиотеками встала новая социальная функция по обучению пользователей владением современными компьютерными технологиями. Библиотека играет роль как культурного, информационного, так и образовательного центра. Деятельность вузовской библиотеки направлена на развитие студента, формирование высококвалифицированного специалиста, эрудированного и высоко нравственного человека. В связи с увеличением потока информации, в вузе возрастает роль библиотеки. Вузовские библиотеки занимают одно из важнейших мест в информационно-образовательной среде своих учебных заведений. Они успешно ведут библиотечно-информационное обслуживание в помощь учебной, педагогической и научной деятельности. Сегодня библиотеки стремятся стать не только обладателями документов по

профилю вуза, но и реальными информационными центрами, которые обеспечивают своих потребителей всем спектром необходимой информации, создают им комфортные условия для поиска и получения знаний.

### **Цель и задачи исследования**

Определившись с проблемой исследования, ставим целью представить наиболее полно современные информационные технологии и ресурсное обеспечение в теоретическом и практическом аспектах. С этой целью намечаем следующие задачи:

- раскрыть современные информационные технологии и ресурсное обеспечение вузовских библиотек, представив их описание в научных трудах зарубежных и отечественных ученых;
- продемонстрировать практическое применение в учебном процессе вуза.

### **Научные исследования проблемы**

Изучением внедрения современных информационных технологий в библиотеках занимались ученые: М. А. Дворецкая, А. С. Деденева, А. В. Лашас, Л. М. Рыбакова, М. Я. Дворкина, О. В. Демидова, Г. А. Евстигнеева, Л. В. Енина, О. В. Кулева, Е. В. Стебликова и другие [1-10]. Исследователи показали новые виды и формы библиотечных услуг. Раскрыли изменения в технологии и организации библиотечного обслуживания, в общении пользователей и библиотекарей во всей библиотечной среде.

### **Основное содержание статьи**

Библиотека – это информационный центр, она всегда должна быть доступной, современной и привлекательной для своих пользователей. На сегодняшний день основная масса вузовских библиотек работает с применением новых современных технологий в области накопления, хранения и передачи данных, что значительно повышает эффективность обслуживания, а также улучшает обеспеченность студентов именно новым учебным материалом и тем самым улучшает учебный процесс.

Качественную систему информационного обслуживания сегодня нельзя представить без электронно-библиотечных систем (ЭБС), электронных каталогов, виртуальных справочных служб, интерактивного заказа литературы и др. Библиотеки стремятся обеспечить удаленный доступ к полнотекстовым материалам как собственной генерации, так и созданным крупнейшими производителями электронного контента.

Выполняя новые правила в современных условиях, сотрудники библиотеки активно развивают традиционную библиотеку, обеспечивая взаимодействие двух параллельных информационных систем: традиционной (бумажной) и инновационной (цифровой) в интересах пользователей.

Ожидания пользователей от библиотеки сегодня таковы:

- оперативное и качественное обслуживание,
- использование в процессе обслуживания не столько возможностей библиотеки, сколько любых доступных информационных ресурсов, дающих ответ на его запрос.

Принципы работы современных вузовских библиотек существенно отличаются от работы библиотек даже 20-25 лет назад. Сейчас одним из основных средств удовлетворения информационных потребностей пользователей в библиотеке ДОННТУ является электронный каталог (ЭК). Создание электронного каталога в НТБ ДОННТУ было начато в 1992 году в автоматизированной системе MARC, что значительно упростило работу пользователей с библиотекой. Несомненным плюсом электронного каталога является и то, что библиографические записи книг в нем частично аннотированы. Также пользователи библиотеки могут не только осуществлять информационный поиск, но и через систему авторизованного доступа осуществить предварительный заказ издания для оперативного получения нужного материала в отделах обслуживания. Роль их в системе образования не следует недооценивать. Они используются студентами, магистрантами, аспирантами при написании курсовых, дипломных и диссертационных работ, при подготовке статей и докладов. На сегодняшний день для преподавателей электронные каталоги и электронно-библиотечные системы – неизменные помощники при разработке электронных и бумажных учебно-методических комплексов, при составлении списков рекомендуемой литературы, при разработке новых курсов. Систематически пополняется и электронная коллекция библиотечного фонда, состоящая из работ профессорско-преподавательского состава университета. Доступ к полным текстам работ осуществляется с помощью гипертекстовых ссылок библиографического описания, размещенного в электронно-библиотечной системе собственной генерации.

Благодаря автоматизации, пользователи получили возможность осуществлять многоаспектный удаленный поиск информации, заказывать издания из электронно-библиотечной системы. Сотрудники библиотеки организуют учет и выдачу литературы в

автоматизированном режиме. Все это значительно упрощает обслуживание. Электронная выдача изданий в научно-технической библиотеке ДОННТУ была внедрена в 2010 году. В ходе работы отмечены несомненные преимущества электронной выдачи, по сравнению с традиционной. Все происходит быстро, без очереди. Процесс надежный, удобный, нравится читателям и работникам библиотеки. Сущность электронной выдачи состоит в закреплении определенных экземпляров за конкретным читателем в его электронном формуляре путем считывания штрихового кода сканером с книги. Система выдачи хранит точные сведения о том, какой экземпляр, какого названия выдан, кому конкретно и когда необходимо произвести возврат в библиотеку. Читатель может быть уверен в том, что информация в его электронном формуляре надежно защищена (согласно закона «О персональных данных» №61-ІНС от 09.07.2015).

Актуальным также становится смена приоритетов доставки документа к потребителю. Наиболее удобной для пользователей является электронная доставка, с помощью которой можно с домашнего компьютера уточнить наличие и местонахождение необходимого документа, произвести предварительный заказ в отдел обслуживания библиотеки его печатного варианта, уточнить библиографическое описание, получить фактографическую справку и, главное, иметь доступ к тексту электронного издания при его наличии. Услуга «On-line продление срока пользования литературой» позволяет читателям самостоятельно изменить время возврата книг без посещения библиотеки. При этом пользователю библиотеки необходимо заполнить все поля формы на сайте НТБ ДОННТУ и отправить сообщение. Новую дату возврата литературы читателям сообщают сотрудники отделов обслуживания по телефону или по e-mail.

Сегодня невозможно представить библиотеку ДОННТУ без возврата книг через систему контейнеров, расположенных на территории корпусов университета и общежитий (1, 2, 3 учебные корпуса, 4, 9 общежития). Если пользователь по причине нехватки времени не может сдать литературу в отдел обслуживания библиотеки, он может опустить книги в контейнер, где они в течение рабочего дня будут сняты с абонемента читателя через систему штрих-кода.

В настоящее время все большее значение приобретают информационные ресурсы, содержащие электронные коллекции научно-образовательного характера, в том числе электронно-библиотечные системы (ЭБС). В

образовательных стандартах ФГОС ВПО (3++) отмечено, что вуз «должен обеспечить каждого обучающегося высшего учебного заведения доступом к электронно-библиотечной системе (ЭБС)...». ЭБС IPR BOOKS – ресурс для получения качественного образования, предоставляющий доступ к учебным и научным изданиям, необходимым для обучения и организации учебного процесса. Подключившись к данной системе, ДОННТУ обеспечивает студентов и профессорско-преподавательский состав удаленным доступом к огромному количеству литературы для образовательных целей.

С помощью ЭБС выполняются справки по книгообеспеченности учебных дисциплин по заявкам кафедр. Если раньше выполнение такого рода справок было трудоемким процессом и занимало много времени, то сейчас нужную информацию можно предоставить быстро и в полном объеме. В списках по книгообеспеченности помимо учебных изданий отражаются научная и справочная литература по профилю кафедры. Преподаватели получают информацию не только о том, насколько их дисциплина обеспечена учебными изданиями, но и знакомятся с дополнительной литературой.

В последнее время активно используется перевод книг в цифровой вид. Эта работа производится с соблюдением авторских прав над редкими книгами, или книгами, которые на данный момент не издаются. Это деятельность позволяет сохранить редкие издания и упрощает работу пользователей библиотеки с фондом, обеспечивает доступ к книгам, которые имеются в одном или ограниченном количестве экземпляров. Постепенно библиотека становится посредником между потребителем и производителем. Все больше повышается значимость информации.

Служба электронной доставки документов (ЭДД) – одно из самых важных направлений работы библиотеки по обеспечению научного и учебного процесса в вузе. Электронная доставка документов помогает сделать заказ на электронные копии статей и фрагментов книг из фондов НТБ ДОННТУ, а также поиске необходимой для читателей информации, обращаясь к библиотекам с запросом прислать электронную копию статьи из сборников (материалы региональных, межвузовских научных конференций). Неоценимую помощь пользователям библиотеки оказывает служба межбиблиотечного абонемента (МБА). В рамках МБА научно-техническая библиотека ДОННТУ традиционно сотрудничает с библиотеками города, с вузовскими библиотеками республики, а также российскими библиотеками для заказа электронной копии издания.

В середине 2000 годов в вузовских библиотеках начали появляться виртуальные справочные службы. Под виртуальной справочной службой (ВСС) понимается служба, функционирующая в режиме реального времени, когда читатели используют компьютеры и интернет-технологии для взаимодействия с персоналом библиотеки. На сайте НТБ ДОННТУ справочная онлайн-служба «Виртуальная справка» появилась в 2012 году и представлена в виде форума, где пользователи получают ответы на интересующие их вопросы. Ответы даются в форме фактографических и библиографических справок. Время выполнения справки один рабочий день, что значительно облегчает работу пользователей с поиском необходимых документов в каталогах библиотеки.

С внедрением современных информационных технологий в научно-технической библиотеке ДОННТУ был создан отдел информационных технологий и компьютерного обеспечения. Главными задачами отдела являются:

- обеспечение непрерывного доступа к информационным ресурсам библиотеки для качественного и оперативного обслуживания пользователей;
- ввод в эксплуатацию и поддержка в работоспособном состоянии компьютерной техники и автоматизированных рабочих мест библиотеки;
- интеграция библиотеки в информационное пространство на основе разработки и поддержки собственного сайта;
- дизайн рекламных материалов (баннеров, фото, объявлений, приглашений и т. д.) для имиджевого представления библиотеки.

Ключевым связующим звеном в развитии информационно-образовательного пространства вуза является наличие полноценного сайта библиотеки. Первым этапом создания сайта библиотеки в 2001 году было проведение детального анализа информационных потребностей его потенциальных посетителей. При выработке общей структуры и стратегии наполнения виртуального ресурса учитывались пользовательские интересы. Создание сайта явилось не вопросом имиджа, а насущной практической необходимостью в таком рабочем инструменте, который бы позволил решить ряд задач, которые были поставлены на момент создания:

- организовать виртуальное библиотечное обслуживание;
- дополнить информационно-библиотечное обслуживание новыми формами и методами, связанными с применением современных средств связи и обработки информации. Все эти

подходы реализуются и сегодня в работе научно-технической библиотеки.

Взаимодействие традиционной библиотеки с новейшими электронными технологиями выводит информационную деятельность НТБ на качественно иной, более продуктивный, чем прежде уровень. Но миссия библиотеки – привлечение обучающейся молодежи к чтению – при этом не изменилась, она лишь обрела новую глубину и содержание, получила новый потенциал.

Современные технологии, если правильно ими воспользоваться, отнюдь не уменьшают преимущества и значимость книги, а наоборот – помогают привлечь молодежь к знакомству с литературой. Это замечательный инструмент, который способен развить не только доступ, но и мотивацию к чтению. Привлекает внимание обучающихся к книге и библиотеке и организация проектной деятельности (проект «Открытая книга»), которая была разработана НТБ и Центром информационных компьютерных технологий, в который активное участие принимали не только преподаватели университета, а также и студенты. Использование электронных средств в познавательных и творческих целях – это новый способ постижения культуры и книги. Информационные технологии идеально подходят для того, чтобы, вписавшись в процессы передачи знаний и информации, повысить эффективность работы библиотеки, в том числе и по привлечению молодежи к чтению. Предъявляемые в настоящее время к выпускникам высших учебных заведений требования, связанные с их умением ориентироваться в огромном информационном потоке, применять новые информационные технологии становятся необходимым условием для овладения информационной культурой. А она, в свою очередь, обеспечивает формирование личности, способной грамотно ориентироваться в условиях постоянного прироста информации и применять ее для решения возникающих задач и непрерывного самообразования.

### **Выводы**

Создание оптимальных условий для удовлетворения информационных потребностей высшей школы и информационного обеспечения образовательных технологий невозможно без информатизации старейшего структурного элемента системы высшей школы – вузовской библиотеки. Все вышесказанное приводит к выводу о том, что на сегодняшнем этапе развития значение вузовской библиотеки возрастает, и доступ к разнообразным информационным ресурсам определяется уже

не только традиционными показателями величины библиотечного фонда, а и уровнем комфортности доступа к информации, независимо от ее формата. Насколько высок этот уровень – это одновременно и показатель степени информатизации библиотеки, и условие успеха внедрения современных образовательных технологий.

Новые информационные технологии в практике работы библиотеки, доступ к Интернету значительно повысили статус вузовской библиотеки. Наряду с печатными изданиями в библиотеку поступают издания в электронной форме, а доступ к ним позволяет оперативно и наиболее полно организовать получение информации.

Поступив в университет, каждый обучающийся должен грамотно овладеть знаниями для получения необходимой информации, а в каком виде она представлена (традиционном или электронном) в фонде библиотеки, не имеет значения. И чем раньше он овладеет навыками поиска, оценивания качества, а также правильного использования информации, тем больше уверенности, что он не потеряется в мире стремительно увеличивающихся информационных потоков.

### **Литература**

1. Дворецкая, М. А. Информационные технологии – инструмент удовлетворения запросов / М. А. Дворецкая // Библиография. – 2007. – № 5. – С. 62-64.
2. Деденева, А. Быть на уровне века / А. Деденева // Библиотека. – 2006. – № 10. – С. 55-57.
3. Лашас, А. В. СБО на основе новых информационных технологий / А. В. Лашас // Библиография. – 2010. – № 3. – С. 26-30.

4. Рыбакова, Л. М. Библиографическая продукция вуза: перспективы развития / Л. М. Рыбакова // Библиография. – 2007. – № 5. – С. 45–49.

5. Дворкина, М. Я. Библиотечное обслуживание : новая реальность : лекции / М. Я. Дворкина. – Москва : Издательство Московского государственного университета культуры и искусств, 2003. – 48с.

6. Демидова, О. В. Современные технологии библиотечно - информационного обслуживания [Электронный ресурс] / О. В. Демидова. – Режим доступа: <http://rlst.org.by/izdania/ib110/879.html>

7. Евстигнеева, Г. А. Библиотека в электронной среде - куда стремиться и обо что спотыкаемся / Г. А. Евстигнеева // НТБ. – 2010. – №7. – С.5–9.

8. Енина, Л. В. Обслуживание пользователей университета в условиях гибридной библиотеки / Л. В. Енина // Культура и образование в информационном обществе : материалы междунар. науч. конф. г. Челябинск, сент. 2006 г. – Челябинск, 2007. – С. 1–8.

9. Кулева, О. В. Место библиотек в структуре электронного информационного пространства / О. В. Кулева, Н. С. Редькина // Интернет и современное общество. – 2007. - №2. – С.111–113.

10. Стебликова, Е. В. Опыт внедрения современных информационных технологий в обслуживание читателей в вузовской библиотеке [Электронный ресурс] / Е. В. Стебликов. – Режим доступа: <http://www.gpntb.ru/win/interevents/crimea2005/disk/215.pdf>

*Приходченко Е. И., Кулькова О. В. Современные информационные технологии в ресурсном обеспечении научно-технической библиотеки вуза. В статье рассмотрен материал по информатизации библиотек, что является необходимым условием для обеспечения населения современными библиотечными услугами. Информатизация – это средство обеспечения привлекательности и комфортности библиотеки. Чтобы стать более необходимыми своим читателям, нужно активно использовать технологические изменения, которые произошли за последние годы в библиотеках. Без использования всех образовательных возможностей, которые предоставляют нам современные информационные технологии, нельзя подготовить специалиста, квалификация которого соответствовала бы быстро меняющимся реалиям жизни. Новые информационные технологии в практике работы библиотеки, доступ к Интернету значительно повысили статус вузовской библиотеки. Наряду с печатными изданиями в библиотеку поступают издания в электронной форме, а доступ к ним позволяет оперативно и наиболее полно организовать получение информации.*

**Ключевые слова:** информационные технологии, ресурсное обеспечение, библиотечные услуги, информатизация библиотек, информационные потребности пользователей, информационное пространство, научно-техническая библиотека.

***Prikhodchenko E. I., Kulkova O. V. Modern information technologies in the resource support of the scientific and technical library of the university.*** *The article considers the material on the informatization of libraries, which is a necessary condition for providing the population with modern library services. Informatization is a means of ensuring the attractiveness and comfort of the library. To become more necessary for your readers, you need to actively use the technological changes that have occurred in recent years in libraries. Without using all the educational opportunities that modern information technologies provide us, it is impossible to prepare a specialist whose qualifications would correspond to the rapidly changing realities of life. New information technologies in the practice of the library, access to the Internet have significantly increased the status of the university library. Along with printed publications, the library receives publications in electronic form, and access to them allows you to quickly and to fully organize the receipt of information.*

***Keywords:*** *information technologies, resource support, library services, library informatization, information needs of users, information space, scientific and technical library.*

*Статья поступила в редакцию 14.05.2021  
Рекомендована к публикации профессором Мальцевой Р. В.*

УДК 004.7

## Подготовка специалистов по сетевым технологиям на основе образовательного продукта D-Link в условиях инновационного развития Донбасса

П. В. Ромасевич, Е. В. Смирнова

ФГАОУ «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Российская Федерация  
ООО «Д-Линк Трейд», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: [promasevich@dlink.ru](mailto:promasevich@dlink.ru), [esmirnova@dlink.ru](mailto:esmirnova@dlink.ru)

### Аннотация

*Успешное развитие экономики Донецкой Народной Республики в условиях войны во многом стало возможным благодаря высокому потенциалу учебных заведений ДНР, которые на сегодняшний день активно включены в работу по восстановлению хозяйства Донбасса. На территории Донецкой Народной Республики находится большое количество предприятий металлургической, химической, машиностроительной, топливно-энергетической, легкой и пищевой промышленности, инновационное развитие которых невозможно без цифровизации производственных процессов. Цифровизация производственных процессов предполагает превентивное создание отказоустойчивой инфокоммуникационной инфраструктуры предприятий данных промышленных предприятий и обучение ИТ-специалистов по её эксплуатации и развитию. В этой связи оригинальный образовательный продукт компании D-Link может быть востребован учебными заведениями Донецкой Народной Республики для подготовки и переподготовки специалистов по сетевым технологиям для создания, эксплуатации и модернизации инфокоммуникационной инфраструктуры предприятий в условиях инновационного развития Донбасса.*

### Введение

Экономика независимого Донбасса семь лет функционирует в непростых обстоятельствах, связанных с политическим статусом территории, продолжающимися позиционными военными действиями, оттоком человеческих ресурсов, повреждением инфраструктуры предприятий.

В настоящее время основными отраслями экономики Донецкой Народной Республики являются [1]:

- Металлургия – 21 предприятие;
- Топливо-энергетический комплекс – 12 предприятий;
- Коксохимия и химия – 26 предприятий;
- Горное и промышленное машиностроение – 39 предприятий;
- Производство стройматериалов – 23 предприятия;
- Легкая промышленность – 14 предприятий;
- Пищевая промышленность – 58 предприятий.

Они, в основном, сосредоточены в следующих промышленных центрах:

- Горловско-Енакиевский промышленный район (туда входят г. Енакиево, Горловка, Кировская, Ждановка);

- Донецкий промышленный центр (туда входят г. Донецк, Макеевка, Харцызск, Ясиноватая);
- Шахтёрско-Снежнянский промышленный район (Торез, Снежное, Шахтёрск);
- Отдельный посёлок городского типа Новый Свет Старобешевского района (там находится крупнейшая в ДНР Старобешевская ГРЭС).

Развитие секторов экономики Донецкой Народной Республики на современном этапе невозможно без цифровизации всех производственных процессов – от добычи сырья до глубокой переработки и транспортировки потребителю.

Цифровизация производственно-логистических процессов предполагает превентивное создание безопасной и отказоустойчивой инфокоммуникационной корпоративной инфраструктуры и опережающее обучение специалистов по её эксплуатации и развитию, которые должны обеспечить возможность использования стационарного и мобильного широкополосного доступа для работы корпоративных сетевых приложений, а также сегменты сетей NB-IOT и LPWAN для обеспечения работы телеметрической инфраструктуры промышленных предприятий на

больших производственных территориях.

Инфокоммуникационная структура современного предприятия должна способствовать снижению производственных издержек и может состоять из подсистем видеонаблюдения, мониторинга передвижных средств, телеметрической инфраструктуры сбора

первичной обработки информации с датчиков производственных площадок, офисных сегментов корпоративной сети, агрегации и обработки «больших» данных в ЦОД и выдачи сводной аналитической информации для принятия решений (Рис.1, [2]):

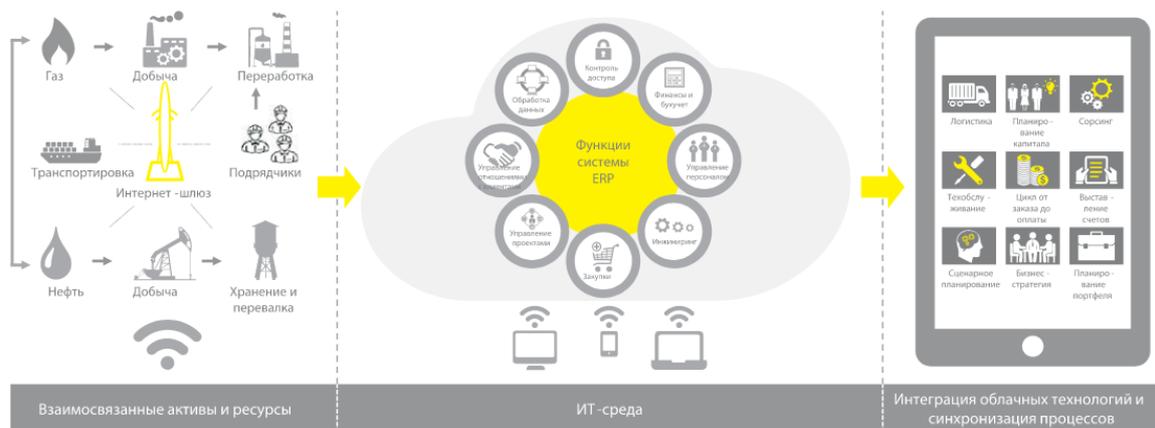


Рисунок 1 – Архитектура цифровой трансформации предприятия

Основой ИТ-архитектуры предприятия является безопасная и отказоустойчивая телекоммуникационная инфраструктура корпоративной сети с возможностью масштабирования и организации мобильного доступа к данным по всей его территории.

При этом в современном международном контексте построение и модернизация инфокоммуникационной экосистемы любой отрасли экономики на «неамериканских» продуктах в настоящее время является вопросом безопасности отрасли и страны в целом.

### Образовательный продукт D-Link

Для создания, эксплуатации и развития безопасной и отказоустойчивой распределенной телекоммуникационной инфраструктуры предприятия необходимо наличие ИТ-специалистов с актуальными компетенциями в области сетевых технологий.

Например, в России по оценкам АПКИТ, в ближайшие годы потребность в ИТ-специалистах различных компетенций составит около 300 тысяч человек ежегодно [3]. Ситуация обостряется также тем, что ИТ-специалистов нужно готовить уже сейчас, поэтому образовательные ресурсы, находящиеся в стадии разработки с последующей апробацией, вряд ли успеют стать востребованными для подготовки кадров в обозримое будущее

В этой связи комплексный образовательный продукт (Рис.2) мирового производителя активного сетевого оборудования D-Link [4] который компания развивает более 15

лет, может быть востребован учебными заведениями для подготовки и переподготовки специалистов по сетевым технологиям для предприятий нефтегазовой отрасли.

D-Link основана в 1986 году на Тайване и является первым производителем активного сетевого оборудования, созданного за пределами США. За двадцать два года работы в России компания накопила солидный методический опыт производственного обучения сетевым технологиям, поставляя оборудование в различные сегменты экономики. Понимание потребностей рынка и практических запросов ИТ-специалистов позволило создать актуальный образовательный продукт обучения сетевым технологиям.

### Использование образовательного продукта D-Link в учебных заведениях

Образовательным продуктом могут бесплатно воспользоваться высшие и средние специальные учебные заведения для подготовки и переподготовки специалистов по сетевым технологиям для предприятий нефтегазовой отрасли.

Для бесплатного получения и использования образовательного продукта учебному заведению необходимо заключить Соглашение о сотрудничестве с компанией D-Link, выбрав удобную форму взаимодействия – академический партнер и/или авторизованный учебный центр [5], каждая из которых обладает определенным набором возможностей.



Рисунок 2 - Комплексный образовательный продукт D-Link

В настоящий момент 63 учебных заведения России являются академическими партнерами, а 20 вузов также организовали на своей базе авторизованные учебные центры D-Link

Образовательный продукт D-Link предлагает восемь обучающих программ:

- «Основы сетевых технологий. Часть 1: Основы передачи и коммутации данных в компьютерных сетях»
- «Основы сетевых технологий. Часть 2: Основы беспроводных сетей Wi-Fi»
- «Основы сетевых технологий. Часть 3: Технологии TCP/IP»
- «Технологии коммутации современных сетей Ethernet»
- «Основы сетевой безопасности. Часть 1: Межсетевые экраны»
- «Основы сетевой безопасности. Часть 2: Технологии туннелирования»
- «Использование Linux при программировании»
- «Введение во встраиваемые системы. Часть 1: Использование Linux и микропроцессорные системы».

Каждая программа обучения включает в себя лекции, презентации к лекциям, методические указания к лабораторным работам, оборудование для учебных классов.

Программы построены таким образом, чтобы их можно было изучать как по отдельности, так и в комплексе. Оборудование для лабораторных классов подобрано с учетом

возможности его использования сразу в нескольких программах обучения.

Преподавателям учебных заведений, желающих использовать материалы D-Link, предоставляется техническая и методическая поддержка процесса обучения.

Портал дистанционного обучения может быть использован преподавателями для проведения вебинаров, тестирования и иных учебных мероприятий для студентов.

Программы D-Link доступны для изучения:

- в партнерских учебных заведениях;
- в офисах D-Link;
- на бесплатном портале дистанционного обучения и сертификации [6].

В настоящее время по четырем программам обучения можно сдать сертификационный экзамен в режиме онлайн. По остальным программам предусмотрен очный экзамен, включающий теоретическую и практическую части. Его можно сдать в любом авторизованном учебном центре D-Link или офисе компании [5]. Помимо перечисленного образовательный продукт включает в себя электронную библиотеку, печатные издания курсов D-Link, каналы в Youtube и Telegram, представительства в социальных сетях Facebook, VK, Instagram.

Печатные издания курсов D-Link, разработанных в сотрудничестве с преподавателями МГТУ им. Н.Э. Баумана и МГУ им. М.В. Ломоносова, имеют гриф УМО для направлений «Информатика и

вычислительная техника», «Прикладная математика и информатика» и «Фундаментальная информатика и информационные технологии», и по мнению авторов статьи могут быть использованы в рамках любого направления ИТ-подготовки, где предусмотрен объем часов по сетевым технологиям.

Один из авторов данной статьи является доцентом кафедры «Телекоммуникационных систем» [8] Волгоградского государственного университета (ВолГУ) и уже более 10 лет успешно использует образовательный продукт D-Link в учебном процессе в рамках направления подготовки 11.03.02/11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» для студентов очной и заочной форм обучения.

Уделяя внимание внедрению комплексного образовательного продукта в учебный процесс вузов, вендор оказывает техническую и методическую поддержку учебным заведениям в создании лабораторных классов, обновлению учебных материалов, сертификации преподавателей и т.п. Для этого D-Link проводит цикл вебинаров для профессорско-преподавательского состава учебных заведений, посвященных образовательным ресурсам компании D-Link, которые могут быть полезны для преподавания сетевых технологий в рамках любого направления ИТ-подготовки студентов всех форм обучения:

- Учебные курсы и образовательные ресурсы D-Link. Опыт использования на кафедре «Телекоммуникационных систем» Волгоградского государственного университета.
- Преподавание сетевых технологий на основе комплекса курсов D-Link «Основы сетевых технологий. Часть 1-3».
- Переподготовка и повышение квалификации персонала операторов связи на основе курса «Технологии коммутации современных сетей Ethernet».
- Особенности использования комплекса курсов D-Link «Основы сетевых технологий. Часть 1-3» для студентов заочной формы обучения.

Информацию о времени проведения вебинаров можно получить от авторов статьи или в новостной ленте на официальном сайте компании D-Link [7].

### **Заключение**

Компания D-Link является ведущим мировым производителем сетевого оборудования, предлагающим широкий набор решений для создания локальных сетей Ethernet/

Fast Ethernet/ Gigabit Ethernet, построения беспроводных сетей и организации широкополосного доступа, передачи изображений и голоса по IP (VoIP).

В 2012 году компания открыла в Российской Федерации собственное производство, сертифицированное в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2008 (ISO 9001:2008). В РФ офисы компании D-Link открыты в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Калининграде, Кемерово, Краснодаре, Красноярске, Новосибирске, Омске, Перми, Ростове-на-Дону, Рязани, Самаре, Туле, Уфе, Хабаровске и Ярославле. В Брянске, Казани, Тюмени и Челябинске работают региональные представители компании.

Авторизованные учебные центры работают в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Ижевске, Кемерово, Магнитогорске, Новосибирске, Омске, Оренбурге, Перми, Ростове-на-Дону, Рязани, Туле и Ярославле.

Оригинальный образовательный продукт компании D-Link может быть востребован учебными заведениями Донецкой Народной Республики для подготовки и переподготовки специалистов по сетевым технологиям для создания, эксплуатации и модернизации инфокоммуникационной инфраструктуры предприятий в условиях инновационного развития Донбасса.

### **Литература**

1. Трокаль, Т. В. Экономическое развитие Донецкой Народной Республики (конец 2019 – начало 2020 гг.) // Постсоветские исследования, 2020. - Т.3. - № 2.
2. Козловский, А. С чего начинается путь в цифровую реальность? [Текст: электронный]. – URL:<http://oilandgasforum.ru/data/files/Digest%20site/DAIDJEST%20WEB2.pdf>
3. ИТ-кадры для цифровой экономики в России [Текст: электронный]. – URL:[https://www.apkit.ru/files/it-personnel%20research\\_2024\\_APKIT.pdf](https://www.apkit.ru/files/it-personnel%20research_2024_APKIT.pdf)
4. Официальный сайт D-Link. – URL:<https://www.dlink.ru/ru/education/3/>
5. Официальный сайт D-Link. – URL:<https://www.dlink.ru/ru/education/5/>
6. Официальный сайт D-Link. – URL:<https://learn.dlink.ru>
7. Официальный сайт D-Link. – URL: <https://www.dlink.ru/ru/news/>
8. Официальный сайт ВолГУ. – URL: <https://volsu.ru/struct/institutes/ipt/telecommunication/>

**Ромасевич П. В., Смирнова Е. В. Подготовка специалистов по сетевым технологиям на основе образовательного продукта D-Link в условиях инновационного развития Донбасса.** Успешное развитие экономики Донецкой Народной Республики в условиях войны во многом стало возможным благодаря высокому потенциалу учебных заведений ДНР, которые на сегодняшний день активно включены в работу по восстановлению хозяйства Донбасса. На территории Донецкой Народной Республики находится большое количество предприятий металлургической, химической, машиностроительной, топливно-энергетической, легкой и пищевой промышленности, инновационное развитие которых невозможно без цифровизации производственных процессов. Цифровизация производственных процессов предполагает превентивное создание отказоустойчивой инфокоммуникационной инфраструктуры предприятий данных промышленных предприятий и обучение ИТ-специалистов по её эксплуатации и развитию. В этой связи оригинальный образовательный продукт компании D-Link может быть востребован учебными заведениями Донецкой Народной Республики для подготовки и переподготовки специалистов по сетевым технологиям для создания, эксплуатации и модернизации инфокоммуникационной инфраструктуры предприятий в условиях инновационного развития Донбасса.

**Ключевые слова:** инновационное развитие, цифровизация, сетевые технологии, ДНР, Донецкая Народная Республика, Донбасс, образовательный продукт, D-Link

**Romasevich P. V., Smirnova E. V. Training of network technologies specialists based on D-Link educational product in conditions of innovative development of Donbass.** Successful development of the Donetsk People's Republic economy in the conditions of war was largely made possible due to the high potential of the DPR educational institutions, which today are actively included in the work on the restoration of the Donbass economy. On the territory of the Donetsk People's Republic there are a large number of industrial enterprises metallurgical, chemical, machine-building, fuel and energy, light and food industries, the innovative development of which is impossible without the digitalization of production processes. Digitalization of production processes involves the preventive creation of a fault-tolerant network communication infrastructure of industrial enterprises and the training of IT specialists in its operation and development. In this regard, the original D-Link educational product can be demanded by educational institutions of the Donetsk People's Republic for the training and retraining of specialists in network technologies for the creation, operation and modernization of network communication infrastructure of industrial enterprises in the conditions of innovative development of Donbass.

**Keywords:** innovative development, digitalization, network technologies, DPR, Donetsk People's Republic, Donbass, educational product, D-Link.

Статья поступила в редакцию 22.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.

## От генетических алгоритмов к метаэвристикам

Ю. А. Скобцов

Санкт-Петербургский государственный аэрокосмического приборостроения,  
г. Санкт-Петербург

e-mail: [ya\\_skobtsov@list.ru](mailto:ya_skobtsov@list.ru)

### **Аннотация**

*Представлен опыт преподавания курсов по генетическим алгоритмам, эволюционным вычислениям, вычислительному интеллекту и метаэвристикам в ряде университетов Донецка и Санкт-Петербурга на уровне бакалавриата и магистратуры. Курсы охватывают пять основных парадигм: искусственные нейронные сети, эволюционные вычисления, нечеткие системы, роевые алгоритмы и искусственные иммунные системы. Все пять парадигм успешно применяются при решении многих научно-технических проблем по отдельности и с использованием гибридных систем. Приведено текущее содержание курсов: основные разделы, лабораторные и курсовые работы. Отмечается важность курсов для аспирантуры.*

### **Введение**

В настоящее время быстро развивается новое направление в теории и практике искусственного интеллекта – эволюционные вычисления[1]. Этот термин обычно используется для общего описания алгоритмов поиска, оптимизации или обучения основанных на некоторых формализованных принципах естественного эволюционного отбора. Преподаванию подобных курсов в США и Европе уделяется большое внимание, что активно обсуждается в печати, например, [2].

В последнее время в университетах США все большее внимание уделяется междисциплинарному образованию и исследованиям, особенно с участием науки, техники, инженерии и математики (STEM) (science, technology, engineering and mathematics) –образования, где это новое направление искусственного интеллекта входит в основные компоненты. Это объясняется тем, что, как правило, курсы по вычислительному интеллекту, в который естественно «переросли» эволюционные вычисления носят междисциплинарный характер.

К сожалению, на территории СНГ это направление (и особенно преподавание) развивается не так быстро, как в других странах. В данной статье изложен авторский опыт преподавания эволюционных вычислений за последние 20 лет.

### **Генетические алгоритмы**

Курс «Генетические алгоритмы» разработан автором в конце 90-х годов и впервые апробирован в Донецком

государственном институте искусственного интеллекта в качестве курса по выбору. Далее он регулярно читался магистрам Донецкого национального технического университета для направлений «Компьютерные науки» и «Компьютерная инженерия» кафедры АСУ, заведующим которой автора пригласили на факультет компьютерных и информационных технологий. Первоначально он включал следующие разделы.

В первом разделе изложены основы простого генетического алгоритма (ГА), описаны генетические операторы репродукции, кроссинговера и мутации. Рассмотрены вопросы представления потенциальных решений для целых и действительных чисел. Во втором разделе изложены математические основы ГА - теория схем, которая показывает влияние генетических операторов на выживание отдельных групп особей, обладающих (или наоборот не обладают) некоторыми свойствами.

Третий раздел посвящен задачам комбинаторной оптимизации. Подробно рассмотрена задача коммивояжера как базовую проблему для NP-полных задач. Изложены основные виды представления потенциальных решений этой задачи и проблемно-ориентированные генетические операторы.

В четвертом разделе представлены современные модификации и обобщения ГА. Изложены различные способы и стратегии реализации всех функциональных блоков основной блок-схемы простого ГА первого раздела. Рассмотрены различные стратегии отбора родителей, двоичные и арифметические операторы кроссинговера и мутации, методы сокращения промежуточной популяции.

Представлены ГА с количеством особей популяции, изменяется, с различными методами определения срока жизни; адаптивные ГА, в которых в процессе эволюции подстраивается вероятность кроссинговера и мутации.

В пятом разделе изложены параллельные генетические алгоритмы, рассмотрены основные виды распараллеливания и способы их реализации. Рассмотрены основные виды параллельных ГА: глобальные (модель «рабочий-хозяин»), распределенные («модель островов») и клеточные.

Кроме лекций были поставлены также лабораторные работы, которые включали поиск экстремумов функций одной и нескольких переменных и комбинаторную оптимизацию с помощью ГА. В процессе развития курс совершенствовался, расширялся и в результате сформировался новый курс «Эволюционные вычисления».

### **Эволюционные вычисления**

История эволюционных вычислений (ЭВ) началась в 60-е годы XX века, когда различные группы ученых в области кибернетики независимо друг от друга исследовали возможности применения принципов эволюции биологических систем при решении различных технических проблем, как правило, требующих решения задач оптимизации. Таким образом, было основано новое научное направление, которое в настоящее время принято называть "эволюционные вычисления".

Генетические алгоритмы первоначально разработаны для задач оптимизации в качестве достаточно эффективного механизма комбинаторного перебора вариантов решения. В отличие от многих других работ, целью автора ГА – Холланда [3] было не только решение конкретных задач, но исследование явления адаптации в биологических системах и применение его в вычислительных системах. При этом потенциальное решение – особь представляется хромосомой – двоичным кодом. Популяция содержит множество особей. В процессе эволюции используются три основных генетических оператора: репродукция, кроссинговер и мутация.

Также в 60-х годах в Германии Рехенберг [4] заложил основы "эволюционных стратегий" при решении задачи оптимизации вещественных параметров в расчете линий электропередачи. Это направление развивалось долгие годы независимо и здесь были получены важные фундаментальные результаты. В эволюционных стратегиях потенциальное решение (особь) является вектором вещественных чисел, популяция состоит из двух особей и основным генетическим оператором является мутация.

Фогель независимо от других исследователей основал эволюционное программирование [5], где потенциальное решение представляется конечным автоматом. Основным генетическим оператором здесь также является мутация, которая случайным образом изменяет таблицу переходов-выходов автомата.

Немного позднее Коза в Массачусетском технологическом институте США заложил основы генетического программирования [6]. Здесь в качестве особи выступала программа на языке LISP, которая представлялась древовидной структурой. На этих структурах были разработаны генетические операторы кроссинговера и мутации.

В настоящее время указанные направления объединены в «эволюционные вычисления», которые успешно применяются при решении многих проблем. При этом отдельные направления взаимодействуют за счет заимствования лучших черт друг у друга.

В новом курсе «Эволюционные вычисления» (ЭВ) были добавлены следующие разделы. Раздел по теоретическим основам ГА который включал: теорию схем, модель динамической системы для ГА, применение Марковских цепей для моделирования конечных популяций, использование методов статистической механики для моделирования ГА. Существенно расширен раздел по модификациям ГА, где приведены различные виды и реализации генетических операторов отбора родителей, кроссинговера и мутации.

Добавлены также классические разделы ЭВ: генетическое программирование (ГП), эволюционные стратегии (ЭС) и эволюционное программирование (ЭП). В разделе генетическое программирование описаны основные структуры, используемые в ГП: древовидные, линейные и графо-подобные. Рассмотрены также вопросы реализации на этих структурах основных генетических операторов кроссинговера и мутации.

Раздел ЭС содержит классическую двукратную и многократную стратегию. В разделе ЭП рассмотрено представление конечного автомата в качестве генома и применение ЭП в задачах прогнозирования и управления. Кроме этого приведены современные направления ЭП. Рассмотрены вопросы реализации эволюционных алгоритмов как программной, так и аппаратной. Кроме классических разделов ЭВ подготовлен также раздел по применению ГА в задачах машинного обучения и раздел по вероятностным ГА.

В таком виде курс «Основы эволюционных вычислений» несколько лет читался магистрам факультета компьютерных и информационных технологий Донецкого

национального технического университета и был опубликован в 2008 году в виде учебного пособия с грифом министерства образования и науки Украины [1]. Это издание подвело итог первому этапу развития курса.

### **Вычислительный интеллект**

Отметим, что общество «Нейронные сети» IEEE (IEEE Neural Network Society) изменило свое название в 2004 году на IEEE Computational Intelligence Society (общество «Вычислительный интеллект») [2]. Вычислительный интеллект (ВИ) является одним из наиболее активно развивающихся и направлений в области информатики и техники и его методы широко используются при решении многих научно-технических проблем.

Первоначально ВИ был определен как комбинация нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов. Более широкое определение вычислительного интеллекта - изучение адаптивных механизмов, позволяющих или облегчающих интеллектуальное поведение в сложных, неопределенных и меняющихся условиях. Эти адаптивные механизмы включают в себя те парадигмы искусственного интеллекта (ИИ), которые демонстрируют способность учиться или адаптироваться к новым ситуациям, обобщать, обобщать, открывать и ассоциировать [7,8].

Парадигмы ВИ имитируют природные явления при решении сложных задач. Другими словами, вдохновленные биологией и природой, эти парадигмы включают нейронные сети, эволюционные вычисления, роевой интеллект, нечеткие системы и искусственные иммунные системы. Вместе с такими разделами, как дедуктивное мышление, экспертные системы, логика и символика, системы машинного обучения, эти интеллектуальные алгоритмы образуют часть ИИ. ИИ с его многочисленными приемами, сочетанием нескольких научных дисциплин, например, биология, информатика, инженерия, нейро-биология, философия, социология. ИИ востребован как путь будущего развития науки в этой области. Вычислительный интеллект является преемником ИИ и является будущим вычислений. «Интеллект без вычислений похож на птиц без крыльев» [2]. С другой стороны, ВИ имеет отличия от ИИ. Некоторые из методов являются общими для ВИ и ИИ [8].

Традиционно методы ИИ разрабатываются в нисходящем порядке, сверху вниз. Напротив, методы ВИ применяются снизу вверх подход через внедрение структуры и порядка. В области ВИ есть приложения и практический вклад во многих дисциплинах, включая биологию, химию, информатику,

экономику, электромагнетизм, инженерию, иммунологию, информатику, лингвистику, материаловедение, музыку и физику.

Далее для полноты изложения приводятся основные парадигмы ВИ. При этом из-за недостатка места рассматриваются только некоторые из популярных алгоритмов от каждой парадигмы. Существуют пять основных парадигм алгоритмов ВИ, а именно:

- (1) нейронные сети (НС);
- (2) эволюционные вычисления (ЭВ);
- (3) роевой интеллект (РА);
- (4) нечеткие (фаззи) системы (ФС);
- (5) искусственные иммунные системы (ИИС).

Широкий спектр алгоритмов ВИ из этих парадигм включает в себя:

- (1) -искусственные нейронные сети (ИНС);
- (2) -генетические алгоритмы (ГА), генетическое программирование (ГП), дифференциальная эволюция (ДЭ);
- (3) – оптимизация на основе роя частиц (), метод муравьиных колоний (ММК);
- (4) нечеткие системы логического вывода (FIS);
- (5) - искусственная иммунная система (ИИС), алгоритм клонального отбора (АКО).

**ИНС:** ИНС были разработаны в форме параллельных распределенных сетевых моделей на основе биологических процессов обучения мозга человека [9]. ИНС могут иметь различную архитектуру, наиболее популярными являются следующие: многослойный персептрон, радиальная базисная функция и вероятностные нейронные сети [9]. Обычно ИНС состоят из входного слоя, выходного слоя и одного или нескольких скрытых слоев. Число скрытых слоев, количество нейронов в каждом слое, функции активации нейронов и алгоритм обучения являются основными параметрами, которые следует учитывать при реализации.

**ЭВ:** ГА и ГП разработаны на основе модели эволюции выживания наиболее приспособленных особей (взятых из генетики) [1, 7]. ГА представляют класс стохастических процедур поиска, основанных на принципах естественной генетики. Здесь моделируется эволюционный процесс с постоянной численностью популяции -возможных решениях в пространстве поиска. Каждый отдельный член популяции представляется строкой, известной как геном. Стандартная реализации ГА включает в себя следующие вопросы: представление генома, особь – потенциальное решение, создание начальной популяции, оценка фитнес-функции (качества потенциальных решений), отбор особей для размножения, создание новых индивидов с использованием генетических операторов

кроссовера и мутации, определение критериев окончания. ГП имеет много общего с ГА.

Основное отличие ГП и ГА заключается в представлении решения. В случае ГА, результатом является строка чисел, представляющих решение. С другой стороны, ГП представляет компьютерную программу в форме древовидной структуры, связывающей различные входы (листья) через математические функции (узлы) на выходе (корневой узел) [14].

**РА:** РА является методом стохастической оптимизации, основанным на популяции, навеванным социальным поведением стаи птиц [8,10]. Алгоритм ищет оптимальное значение путем совместного использования когнитивной и социальной информации среди особей (частиц). РА имеет много преимуществ перед методами эволюционных вычислений, таких как ГА, с точки зрения более простой реализации, более быстрой скорости сходимости и меньшее количество параметров для настройки.

**ФС:** Фаззи системы моделируют человеческие рассуждения на основе нечеткой концепции, позволяющей иметь дело с неточной и неопределенной информацией [8]. Сочетание неполной, неточной информации и нечеткого вывода в процессе принятия решений делает нечеткую логику очень эффективной при моделировании сложных технических проектов, бизнеса, финансов и систем управления, которые сложно моделировать другими средствами. Основные проблемы в применении нечетких (фаззи) систем: выбор нечетких функций принадлежности с точки зрения числа и типа, разработка базы правил, имитирующей процесс принятия решений, а также коэффициенты масштабирования, используемые на стадиях фаззификации и дефаззификации. Эти параметры и структуры, в общем, находятся на основе проб и ошибок и экспертных знаний.

**ИИС:** Искусственные иммунные системы разработаны на основе моделирования механизмов естественной иммунной системы [8]. Все живые существа обладают способностью оказывать сопротивление внешним инфекциям и формировать (частичный или полный) иммунитет к возбудителям болезней или инфекциям.

Эти методы ВИ были разработаны на базе идей и моделей биологических иммунных систем. Методы ИИС используют различные аспекты иммунной системы, такие как паттерн, сопоставление, извлечение признаков, обучение и память, разнообразие, распределенная обработка, самоорганизация и самозащита. Разработка ИИС состоит из трех основных этапов: представление решения, оценка взаимодействий и процедура адаптации. Различные алгоритмы ИИС предложены на

основе модели адаптации, а именно, отрицательного отбора, клонального отбора и моделей непрерывной и дискретной иммунной сети.

Возвращаясь к опыту преподавания, следует сказать, что на втором этапе развития курса «Эволюционные вычисления» автор стремился его расширить до описанного выше курса «Вычислительный интеллект». И это почти удалось - на кафедре АСУ ДонНТУ читалось несколько курсов, которые почти полностью покрывали «Вычислительный интеллект»: «Нейронные сети», «Нечеткие системы» и «Эволюционные вычисления», которые содержали также основные роевые алгоритмы. Был также проект издания учебного пособия «Вычислительный интеллект» совместно с преподавателями одного из Харьковских университетов, который, к сожалению, не состоялся. Но расширенный и дополненный роевыми алгоритмами новый курс «Эволюционные вычисления» был издан в издательстве «ИНТУИТ» [7].

В целом, первые 15 лет развития оказались достаточно успешными – курс сформировался, опубликовано 2 учебных пособия, защищено более 50 магистерских работ с использованием математического аппарата эволюционных вычислений и вычислительного интеллекта.

Особенно большое значение курс сыграл при подготовке аспирантов – с применением математического аппарата вычислительного интеллекта было подготовлено и защищено более 15 кандидатских диссертаций и 1 докторская.

Тематика работ была достаточно разнообразная: моделирование и тестирование цифровых схем, обработка и распознавание медицинских изображений, гильотинный раскрой, медицинские экспертные системы, моделирование автоматизированных машиностроительных комплексов, многокритериальная оптимизация производственных расписаний и другие.

В те достаточно сложные годы (особенно девяностые и нулевые), когда практически не было хоздоговорных работ, а бюджетные темы имели мизерное финансирование защищать аспирантов было также непросто. Поскольку ВИ имеет многочисленные приложения в совершенно разных областях, то аппарат ВИ существенно помог определиться при выборе тем исследований.

### **Метаэвристики**

В настоящее время в теории и практике искусственного интеллекта формируется новый раздел, называемый «метаэвристики» [11], который фактически покрывает

вычислительный интеллект и является более общим понятием. Эвристика является алгоритмом, который находит «достаточно хорошие» решения сложной проблемы за приемлемое время, теоретически не обосновывая их правильность или оптимальность, т.е. эмпирическим путем. Метаэвристика расширяет возможности эвристик, комбинируя эвристические методы (процедуры) на основе некоторой высокоуровневой стратегии (приставка «мета»). Термин «метаэвристика» введен Гловером в 1986 г. [11] и до сих пор является дискуссионным. В частности, некоторые специалисты отмечают, что метаэвристики пересекаются со стохастической оптимизацией, где в той или иной мере используется случайность для поиска (или достижения) оптимального решения сложных задач. С этой точки зрения метаэвристики – наиболее общие алгоритмы этого класса и могут использоваться для решения широкого спектра задач.

Предложено около 150 различных метаэвристик и их число продолжает расти [12,13]. Наиболее популярные 50 метаэвристик описаны в [12,13].

Поэтому в настоящее время формируются новые курсы, которые содержат различные (под)множества метаэвристик. Это необходимо учитывать при построении образовательных курсов. Обычно, помимо разделов, содержащих эволюционные вычисления (или вычислительный интеллект), в курс включаются наиболее популярные метаэвристики.

Следует отметить, что многие метаэвристики в основе указанной высокоуровневой стратегии используют модели некоторых естественных или искусственных систем – биологических, физических, социальных и т.п.

Например, эволюционные метаэвристики (генетические алгоритмы и т.п.) используют модель искусственной эволюции, в процессе которой находится (суб)оптимальное решение. Первоначально, как правило, эти модели создаются для формального описания соответствующей системы, а далее они «отрываются» от исходной системы и «живут своей жизнью» - в основном, применяются для решения задач оптимизации.

Отметим, что в качестве базовых систем (явлений) часто выступают биологические и социальные системы. Поэтому часть метаэвристик относят к био-инспирированным алгоритмам (навеянными природой), например [10,13]. В этом случае, как правило, применяются модели биологических или социальных систем.

### **Текущее состояние преподавания**

С 2015 г. по настоящее время автор преподавал подобные курсы в ряде университетов Санкт-Петербурга: Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики и Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения.

В результате полученного опыта автор пришел к следующей 2-х уровневой схеме преподавания:

1) в рамках бакалавриата на 4-м курсе излагаются основные разделы ЭВ и некоторые метаэвристики;

2) в магистратуре на 1-м курсе преподаются более «продвинутые» и сложные разделы ЭВ и метаэвристики.

Итак, базовый курс в бакалавриате содержит следующие разделы:

1. Основы ГА.
2. Модификации и обобщения ГА.
3. Эволюционный подход к оценке сложности программных проектов.
4. Генетическое программирование.
5. ГА комбинаторной оптимизации.
6. Эволюционное программирование.
7. Эволюционные стратегии.
8. Дифференциальная эволюция.
9. Эволюционный метод планирования программных проектов.
10. Роевые алгоритмы.
11. Муравьиные алгоритмы.
12. Искусственные иммунные системы.

Кроме лекций выполняются 7 лабораторных работ:

ЛР1 - Простой ГА.

ЛР2 - ГА поиска экстремумов функций многих переменных.

ЛР3 - Комбинаторная оптимизация на основе ГА (задача коммивояжера).

ЛР4 - Символьная регрессия.

ЛР5 - Эволюционная стратегия (экстремум функции многих переменных).

ЛР6 - Муравьиный алгоритм (задача коммивояжера).

ЛР7 - Роевой алгоритм (экстремум функции многих переменных).

Кроме этого во втором семестре выполняется курсовой проект. Темы курсовых проектов, в основном, связаны с приложениями ЭВ в программной инженерии. Прежде всего, это эволюционные методы оценки сложности и планирования программных проектов.

В магистратуре «продвинутый» курс

включает следующие темы:

Тема 1 - Мультимодальные эволюционные алгоритмы.

Тема 2 - Многокритериальные ЭА.

Тема 3 - Условная эволюционная оптимизация.

Тема 4 - Параллельные эволюционные алгоритмы.

Тема 5 - Вероятностные ГА первого и высоких порядков.

Тема 6 - Эволюционные методы тестирования программ.

Тема 7 - Аппаратная реализация ЭА.

Тема 8 - Динамические ЭА.

Тема 9 - Гибридизация ЭА.

Тема 10 - Эволюционная комбинаторная оптимизация (производственные расписания, SAT решатели).

Тема 11 - ЭА в обучении нейронных сетей.

Предусматриваются следующие лабораторные работы:

ЛР1 - Мультимодальные ЭА;

ЛР2 - Многокритериальные ЭА;

ЛР3 - Условная эволюционная оптимизация;

ЛР4 - Параллельные ЭА.

Т. о. курсы охватывают пять основных парадигм: искусственные нейронные сети, эволюционные вычисления, нечеткие системы, роевые алгоритмы и искусственные иммунные системы.

### **Заключение**

Растущий интерес к вычислительному интеллекту и метаэвристикам в целом в университетах очевиден. Очевиден также интерес к широким областям кибер-инфраструктуры, кибер-физических систем для понимания сложных междисциплинарных систем и их развития, как видно из различных программ, принятых на федеральном уровне.

Актуальна необходимость в обучении будущего поколения в таких «кибер»- областях и вычислительного интеллекта [15].

Представленный опыт преподавания курсов по генетическим алгоритмам, эволюционным вычислениям, вычислительному интеллекту и метаэвристикам в ряде университетов Донецка и Санкт-Петербурга на уровне бакалавриата и магистратуры может быть успешно использован также в других университетах при подготовке специалистов и при решении многих научно-технических проблем по отдельности и с использованием гибридных систем.

### **Литература**

1. Скобцов, Ю. А. Основы эволюционных вычислений / Ю. А. Скобцов. - Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с.
2. Venayagamoorthy, G. K. A Successful Interdisciplinary Course on Computational Intelligence // IEEE Computational Intelligence Magazine, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Feb 2009. - P. 14-23.
3. Holland, J. H. Adaptation in natural and artificial systems / J. H. Holland. – Cambridge, Michigan: MIT Press, 1992. – 228 p.
4. Rechenberg, I. Evolutionstrategia: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. - Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1973.
5. Fogel, I. J. Artificial Intelligence through Simulated Evolution / I. J. Fogel, A.J.Owens, M. J. Walsh. - New York: Wiley, 1966.
6. Koza, J. R. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. – Cambridge: MIT Press, 1992.
7. Скобцов, Ю. А. Эволюционные вычисления. 2 издание / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский. – М.: Национальный Открытый Университет ИНТУИТ, Лань, 2016.- 326 с.
8. Engelbrecht, A. P. Computational intelligence: introduction. - John Wiley&Sons Ltd, 2007. - 597p.
9. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: Пер с англ.-М.:ООО «И.Д. Вильямс», 2016.-1104 с.
10. Родзин, С. И. Биоэвристики: теория, алгоритмы и приложения: монография / С. И. Родзин, Ю. А. Скобцов, С. А. Эль-Хатиб. – Чебоксары: ИД «Среда», 2019. – 224 с.
11. Glover, F. Handbook of Metaheuristics / F. Glover, G. A. Kochenberger. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 570 p.
12. Скобцов, Ю. А. Метаэвристики / Ю. А. Скобцов, Е. Е. Федоров. - Донецк: изд-во «Ноулидж», 2013. - 426 с.
13. Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие.-Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
14. Скобцов, Ю. А. Эволюционные методы в программной инженерии: учебное пособие. - СПб.: ГУАП, 2020. – 129 с.
15. Yuriy Skobtsov. Prospects of the interdisciplinary course "Computational intelligence" in engineering education // Studies in Systems, Decision and Control.- Volume 342. Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. - Springer, 2021.- P. 431-441.

**Скобцов Ю. А. От генетических алгоритмов к метаэвристикам.** Представлен опыт преподавания курсов по генетическим алгоритмам, эволюционным вычислениям, вычислительному интеллекту и метаэвристикам в ряде университетов Донецка и Санкт-Петербурга на уровне бакалавриата и магистратуры. Курсы охватывают пять основных парадигм: искусственные нейронные сети, эволюционные вычисления, нечеткие системы, роевые алгоритмы и искусственные иммунные системы. Все пять парадигм успешно применяются при решении многих научно-технических проблем по отдельности и с использованием гибридных систем. Приведено текущее содержание курсов: основные разделы, лабораторные и курсовые работы. Отмечается важность курсов для аспирантуры.

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы, эволюционные вычисления, метаэвристики, вычислительный интеллект.

**Skobtsov Yu. A. From genetic algorithms to metaheuristics.** The experience of teaching courses on genetic algorithms, evolutionary computing, computational intelligence and metaheuristics at a number of universities in Donetsk and St. Petersburg at the undergraduate and graduate levels is presented. The courses cover five main paradigms: artificial neural networks, evolutionary computing, fuzzy systems, swarm algorithms, and artificial immune systems. All five paradigms are successfully applied in solving many scientific and technical problems individually and using hybrid systems. The current content of the courses is given: the main sections, laboratory and coursework. The importance of the courses for postgraduate studies is noted.

**Key words:** genetic algorithms, evolutionary computing, metaheuristics, computational intelligence.

Статья поступила в редакцию 26.04.2021  
Рекомендована к публикации доцентом Приваловым М. В.

## Исследование переходных процессов в системе управления проветриванием угольных шахт в выемочных участках минимально-фазового типа

О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев  
Донецкий национальный технический университет

e-mail: olga.donntu@gmail.com

### Аннотация

Для автоматической стабилизации и установления желаемого режима проветривания на выемочных участках минимально-фазового типа при эффективной компенсации опасных всплесков концентрации метана относительно исходного уровня предложено использовать регулятор расхода воздуха в виде инерционного звена первого порядка. Аналитически определены оптимальные настройки регулятора расхода воздуха, при которых обеспечиваются устойчивость системы управления проветриванием участков минимально-фазового типа, желаемая точность работы системы управления, безопасный характер переходных процессов при регулировании и стабилизации режимов проветривания участков. Адекватность проведенных аналитических исследований и работоспособность предложенных систем управления проветриванием участков обоснована математическим моделированием.

### Введение

Необходимым условием производительной и безопасной работы горняков является надежная и безопасная работа вентиляционной системы шахты. В силу этого вопросам автоматизации шахтной вентиляционной сети и системы проветривания выемочных участков уделяется большое внимание научных исследователей. В разное время этими вопросами занимались Фельдман Л.П., Святный В.А., Лапко В.В. из ДПИ (Донецк), Касимов О.И., Капиев Р.Э из МакНИИ (Макеевка), Пучков Л.А. из МГИ (Москва), Петров Н.Н. из Сибирского отделения Академии Наук РФ (Новосибирск) и др.

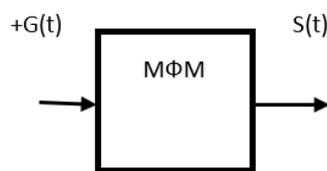
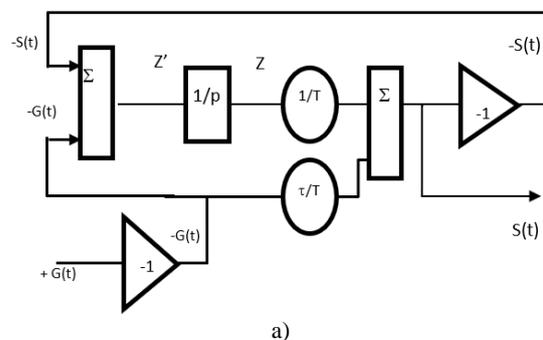
Однако синтез автоматической системы управления проветриванием участков, обеспечивающей устойчивую стабилизацию желаемого режима проветривания и безопасный по газу характер переходных процессов при регулировании режима проветривания, и сейчас является актуальной научной задачей.

В настоящей работе предложена и обоснована обобщенная структура системы управления проветриванием участков минимально-фазового типа, обеспечивающая стабильную и безопасную работу системы вентиляции выемочных участков.

### Характеристика минимально-фазовых участков

Научными исследованиями и шахтными наблюдениями [1,2,3] установлено, что вся совокупность систем проветривания выемочных

участков относится к классу минимально- или неминимально-фазовых объектов управления, которые различаются характером переходных процессов по газу [4]. Аналоговая модель участка минимально-фазового типа (1) показана на рис.1 [5].



МФМ – минимально-фазовая модель

б)

Рисунок 1 –Аналоговая модель системы проветривания участков минимально-фазового типа: а) структурная схема модели; б) функциональная схема модели

Газодинамические свойства участков минимально-фазового типа описываются дифференциальным уравнением:

$$T \frac{dS}{dt} + S = -\tau \frac{dG}{dt} - G, \quad (1)$$

где  $S=(C-C_o)/C_o$ ,  $G=(Q-Q_o)/Q_o$  – безразмерные относительные значения концентрации метана и расхода воздуха на выходе участка, соответственно;

$C_o$ ,  $Q_o$  – концентрация участка и расход воздуха в установившемся режиме, соответственно;

$T$ ,  $\tau$  – соответственно постоянная времени участка и коэффициент пропорциональности

дифференцирующей составляющей расхода воздуха – управляющего воздействия.

На рис.2 показаны графики переходных процессов на участке при форсированном изменении расхода воздуха при увеличении дебита воздуха, а на рис.3 при его уменьшении.

При форсированном изменении расхода воздуха на входе модели участка сначала на выходе участка также происходит скачкообразное изменение концентрации метана, которое потом сменяется постепенным ростом концентрации метана до установившегося значения (рис.2).

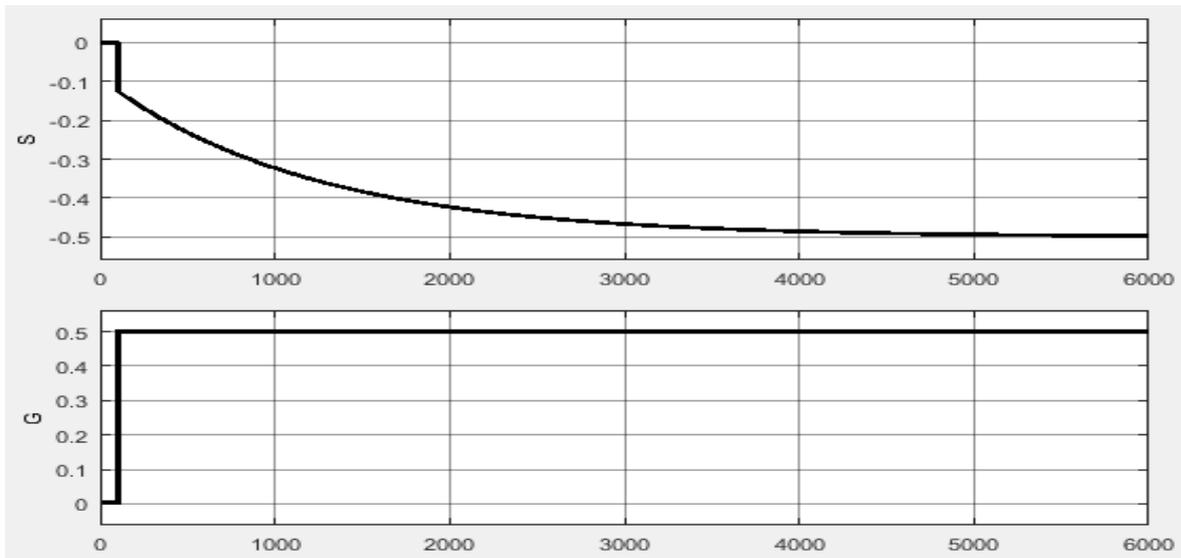


Рисунок 2 – Графики переходных процессов на участке минимально-фазового типа (рис.1) при форсированном увеличении расхода воздуха

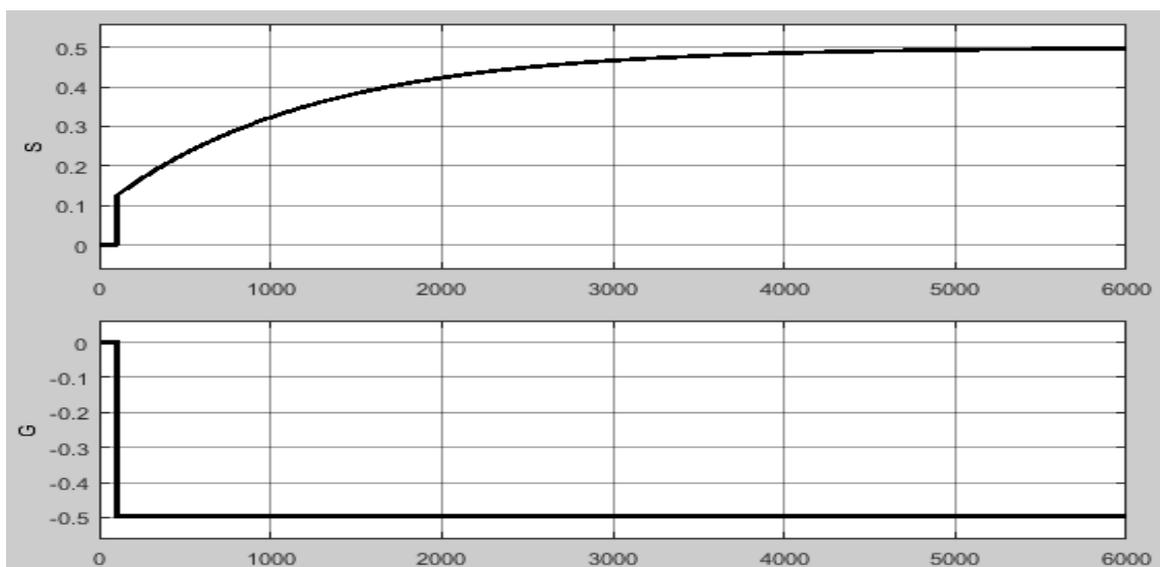


Рисунок 3 – Графики переходных процессов на участке минимально-фазового типа (рис.1) при форсированном уменьшении расхода воздуха

При этом полярность всплеска концентрации метана относительно исходного уровня  $S=0$  идентична по знаку уровню концентрации метана в установившемся режиме. Таким образом, исходя из характера переходных процессов на участке, синтез системы управления проветриванием участка сводится к обеспечению стабилизации желаемого режима проветривания в условиях нестационарности газодинамических параметров участка и корректной отработке необходимых изменений режима проветривания.

**Синтез и моделирование системы управления проветриванием участков минимально-фазового типа**

Для реализации желаемых режимов управления проветриванием участков используем закон управления:

$$G = -\frac{1}{T_{вp}}(S_z - S), \quad (2)$$

где  $T_{в}$  – постоянная времени регулятора расхода воздуха;  $S_z$  – заданное значение концентрации метана в исходящей струе участка.

При компоновке системы управления проветриванием участков минимально-фазового типа регулятором расхода воздуха (2) переходные процессы в замкнутой системе управления согласно (1-2) описываются передаточной функцией:

$$S = G \frac{-\tau p - 1}{T_p + 1} = -\frac{1}{T_{вp}}(S_z - S) \frac{-\tau p - 1}{T_p + 1} = \frac{1 + \tau p}{T_{вp}(T_p + 1)}(S_z - S).$$

После очевидных преобразований получим:

$$T_{в}T\dot{S} + (T_{в} + \tau)\dot{S} + S = S_z + \tau\dot{S}_z. \quad (3)$$

Для обеспечения абсолютной устойчивости системы (3) примем  $T_{в} \gg \tau$ .

При ограничении (4) уравнение (3) принимает вид:

$$T_{в}T\dot{S} + T_{в}\dot{S} + S = S_z + \tau\dot{S}_z. \quad (5)$$

Для исследования динамических свойств системы управления (5) рассмотрим переходные процессы в системе при типовой форме изменения задающего воздействия – при скачкообразном изменении уровня задающего воздействия  $S_z$  и  $dS/dt \rightarrow \infty$ .

Для анализа переходных процессов в системе управления при скачкообразном изменении задающего воздействия  $S_z$  уравнение (5) представим в виде:

$$\frac{d}{dt}(T_{в}T\dot{S} + T_{в}S - \tau S_z) = S_z - S.$$

В общем случае имеем:

$$T_{в}T\dot{S} + T_{в}S - \tau S_z = \int_0^t (S_z - S) dt,$$

где  $t=0$  – начало переходного процесса, обусловленное скачкообразным изменением задающего воздействия.

При произвольной форме изменения переменных  $S_z$  и  $S$ , справедливо соотношение:

$$T_{в}T\dot{S} + T_{в}S - \tau S_z(t=0) = \int_0^0 (S_z - S) dt = 0. \quad (6)$$

В силу этого, согласно (6), имеем:

$$T_{в}T\dot{S}(0) + T_{в}S(0) - \tau S_z = 0. \quad (7)$$

Таким образом, если до изменения задающего воздействия в исходном состоянии концентрация метана на выходе участка  $S(0)=0$ , то, согласно (7), в системе (5)

$$\dot{S}(0) = \gamma \cdot S_z, \text{ где } \gamma = \tau/T_{в}T.$$

Тогда после установления желаемого уровня задающего воздействия  $S_z(t>0)=const$  и  $\dot{S}_z(t > 0) = 0$  переходные процессы в системе управления будут описываться дифференциальным уравнением:

$$T_{в}T\dot{S} + T_{в}\dot{S} + S = S_z, \quad (8)$$

где  $S(0)=0, \dot{S}(0) = \gamma \cdot S_z$ .

Корни характеристического уравнения  $T_{в}T\dot{S} + T_{в}\dot{S} + S = 0$  системы (8) имеют вид:

$$r_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{e}}{2T}, \quad (9)$$

где  $e=1-(4T/T_{в})$ .

Для обеспечения экспоненциального характера переходного процесса в системе управления (8) примем в (9)  $T_{в} > 4T$ .

Тогда решение однородного уравнения в итоге будет иметь вид:

$$S_{одн} = A \cdot e^{-t/T_1} + B \cdot e^{-t/T_2}, \quad (10)$$

где, согласно (9),  $T_1 = 2Tm_1; T_2 = 2Tm_2; m_1 = \frac{1}{1-\sqrt{e}}; m_2 = \frac{1}{1+\sqrt{e}}$ ,  $A, B$  – постоянные интегрирования,  $S_{одн}$  – решение однородного уравнения системы (8).

В силу этого решение уравнения (8) будет иметь вид:

$$S(t) = S_{\text{одн}} + S_z = A \cdot e^{-t/T_1} + B \cdot e^{-t/T_2} + S_z;$$

где  $S(t=0)=A+B+S_z=0$ ,  
 $S'(t=0)=(-A/T_1)-(B/T_2)=\gamma S_z$ .

В итоге получим:

$$\begin{aligned} B &= [T_2/(T_1 - T_2)](1 - \gamma T_1)S_z, \\ A &= [-T_1/(T_1 - T_2)](1 - \gamma T_2)S_z. \end{aligned} \quad (11)$$

Следовательно, общее решение уравнения (8), согласно (10-11), имеет вид:

$$S(t) = \left[ \frac{-T_1}{T_1 - T_2} (1 - \gamma T_2) \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} (1 - \gamma T_1) \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + 1 \right] S_z.$$

Характер переходного процесса функции (11) определяется свойствами ее производной:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) &= \left[ (-A/T_1) \cdot e^{-t/T_1} - (B/T_2) \cdot e^{-t/T_2} \right] S_z = \left[ \frac{1 - \gamma T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} - \frac{1 - \gamma T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right] S_z = \\ &= \frac{e^{-t/T_1} (1 - \gamma T_2) - e^{-t/T_2} (1 - \gamma T_1)}{T_1 - T_2} S_z = e^{-\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} t} \left[ 1 - \frac{1 - \gamma T_1}{1 - \gamma T_2} \right] S_z \end{aligned}$$

Учитывая номинальные параметры участка и принимая рекомендуемые параметры системы управления, согласно (4) и (10), получим следующие коэффициенты настройки системы управления:

$$\begin{aligned} T_B &= 20 \cdot \tau = 5 \cdot T; \\ e &= 1 - 4T/T_B = 1 - 0.8 = 0.2; \\ m_1 &= \frac{1}{1 - \sqrt{e}} = \frac{1}{1 - \sqrt{0.2}} = 1.81; \\ m_2 &= \frac{1}{1 + \sqrt{e}} = \frac{1}{1 + \sqrt{0.2}} = 0.691. \end{aligned}$$

Откуда имеем:

$$\gamma \cdot T_2 = \tau / (T_B T) \cdot 2T \cdot m_2 = 0.1 \cdot m_2.$$

Таким образом, получим:

$$\dot{S}(t) = \frac{1 - 0.1m_2}{2T(m_1 - m_2)} \cdot \exp(-t/T_1) * \left[ 1 - \frac{1 - 0.1m_1}{1 - 0.1m_2} \cdot \exp(-t \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}) \right] S_z \quad (12)$$

Поскольку  $0.1m_1 < 1$ ,  $0.1m_2 < 1$  и  $(1 - 0.1m_1) < (1 - 0.1m_2)$ , то, согласно (12), имеем:

$$\begin{aligned} \dot{S}(t=0) &= \left[ \frac{1 - 0.1m_1}{2T(m_1 - m_2)} * \frac{1 - 0.1m_2 - 1 + 0.1m_1}{1 - 0.1m_2} \right] S_z = \\ &= \frac{0.1(m_1 - m_2)}{2T(m_1 - m_2)} S_z = \frac{0.1}{2T} S_z; \end{aligned}$$

$$\dot{S}(t > 0) = E \cdot S_z,$$

$$\text{где } E = \frac{1 - 0.1m_2}{2T(m_1 - m_2)} e^{-t/T_1} * \left( 1 - \frac{1 - 0.1m_1}{1 - 0.1m_2} \cdot e^{-t \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}} \right),$$

$$0 < \frac{1 - 0.1m_2}{2T(m_1 - m_2)} < 1,$$

$$0 < \frac{1 - 0.1m_1}{1 - 0.1m_2} < 1,$$

$$0 < e^{-t/T_1},$$

$$e^{-t \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2}} < 1,$$

$$0 < E < 1.$$

Таким образом, полярность производной регулируемой функции  $S(t)$  в течение всего переходного процесса остается неизменной. В силу этого концентрация метана  $S(t)$  в системе управления (4) плавно либо нарастает при  $S_z > 0$ , либо убывает при  $S_z < 0$  по экспоненциальному закону до установившегося значения  $S=S_z$ .

Аналоговая модель исследованной функциональной схемы системы управления (5) [5,6] показана на рис.4. Ее временные графики при скачкообразном изменении задающего воздействия  $S_z$  (рис.5) качественно и количественно эквивалентны полученному аналитическому описанию переходных процессов (11)-(12), что подтверждает корректность математического описания переходных процессов в системе управления.

Модель исследовалась при следующих значениях параметров:

$$\tau = 300 \text{ сек}; T = 1200 \text{ сек}; T_B = 6000 \text{ сек.}$$

Аналоговая модель структурной схемы системы управления (4) показана на рис.6. Ее временные диаграммы при скачкообразном изменении задающего воздействия (рис.7) практически адекватны соответствующим временным диаграммам функциональной схемы управления (рис.5), что подтверждает и обосновывает корректность принятых упрощений при аналитических исследованиях и рекомендуемых коэффициентов настройки системы управления проветриванием участков минимально-фазового типа.

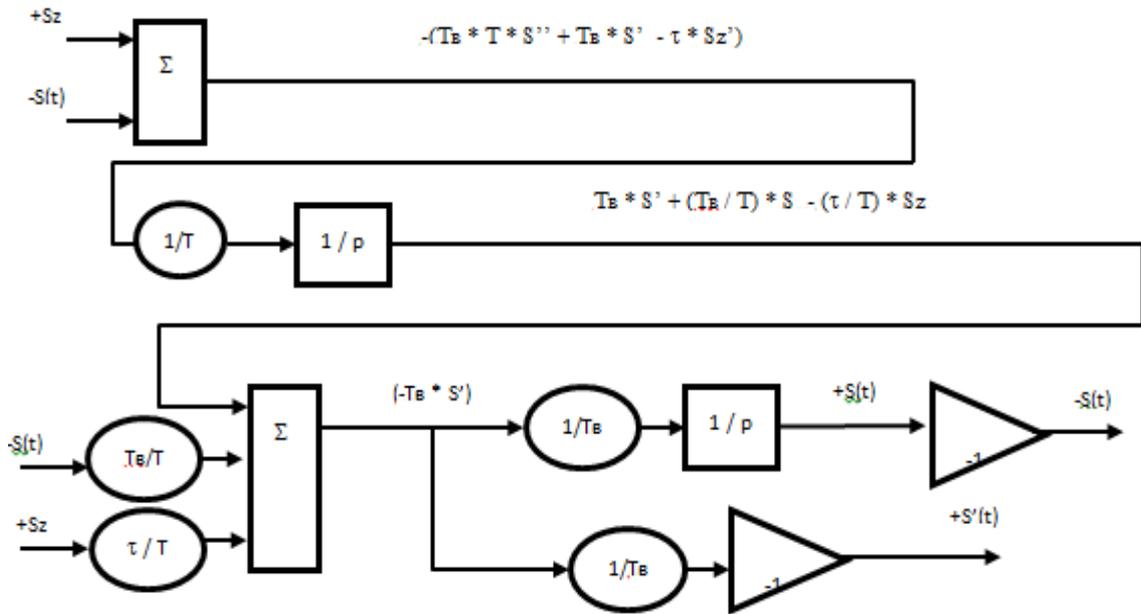


Рисунок 4 – Аналоговая модель эквивалентной функциональной схемы системы управления проветриванием участков минимально – фазового типа

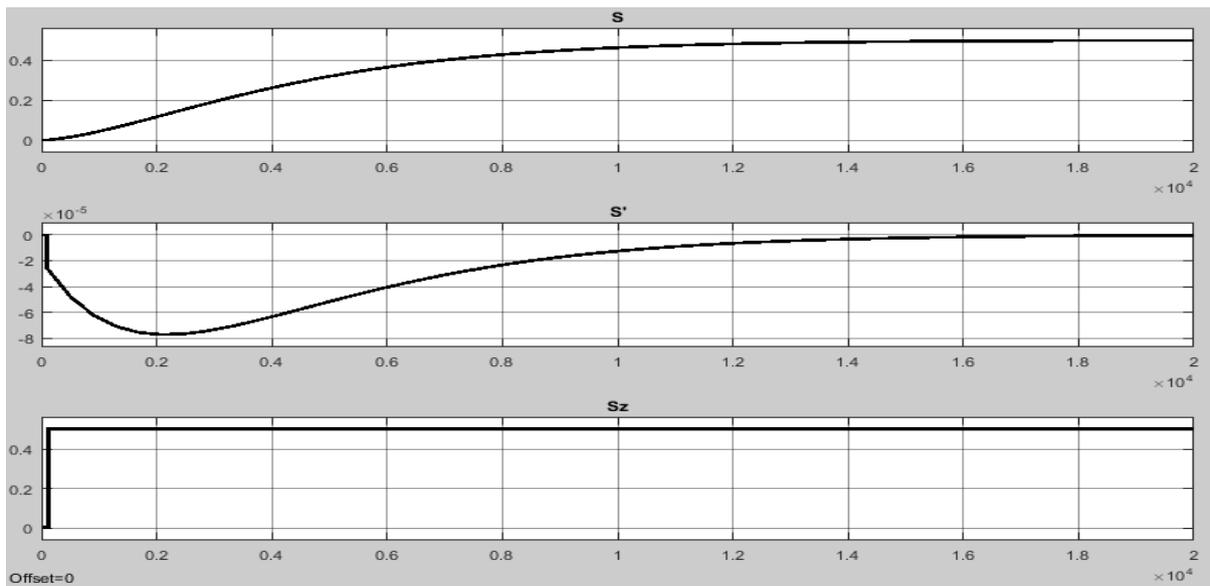


Рисунок 5 - Временные диаграммы эквивалентной функциональной схемы управления проветриванием участков минимально-фазового типа

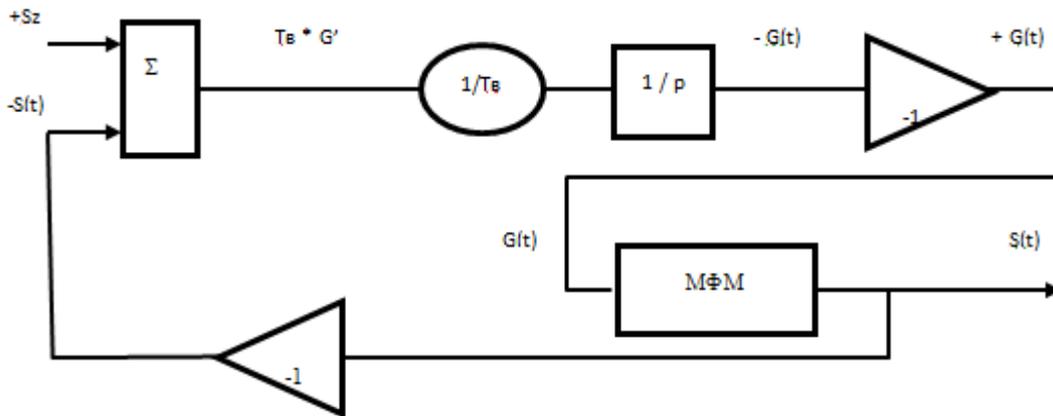


Рисунок 6 – Аналоговая модель структурной схемы управления проветриванием участков минимально-фазового типа

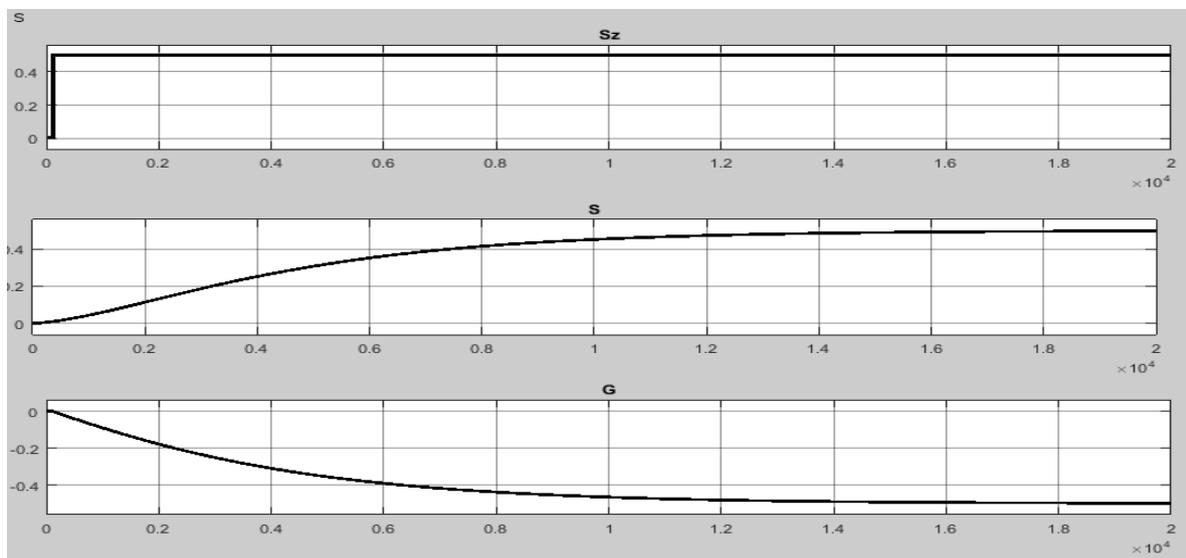


Рисунок 7 - Временные диаграммы структурной схемы управления проветриванием участков минимально-фазового типа

### Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему:

- в качестве регулятора расхода воздуха в системе управления проветриванием выемочных участков предложено использовать инерционное звено первого порядка;
- в общем виде получено аналитическое описание переходных процессов в системе управления проветриванием участков, обладающих минимально-фазовыми динамическими свойствами;
- определена постоянная времени регулятора расхода воздуха системы управления проветриванием участков, при которой обеспечивается устойчивость системы и безопасный по газу характер переходных процессов управления;
- требуемое качество и работоспособность синтезированных систем управления

проветриванием участков, корректность и работоспособность разработанных алгоритмов управления обоснованы и подтверждены аналоговым моделированием типовых режимов работы синтезированных систем управления.

### Литература

1. Абрамов, Ф. А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф. А. Абрамов, Л. П. Фельдман, В. А. Святный. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
2. Фельдман, Л. П. Уравнения неустановившегося движения метано-воздушной смеси в выработках и выработанном пространстве участка. / Л. П. Фельдман. – В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1971. - Вып.22. – С.95-105.
3. Ушаков, В. К. Математическое моделирование надежности и эффективности

шахтных вентиляционных систем / В. К. Ушаков : учебное пособие. – М.: изд-во МГГУ, 2003.–182 с.

4. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург: Профессия, 2003. – 752 с.

5. Чередникова, О. Ю. Синтез и математическое моделирование безопасных по газовому фактору систем управления проветриванием участков угольных шахт / О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев // Международный рецензируемый научно-

теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта», 2018. - № 3 (10). – С. 129 – 143.

6. Чередникова, О. Ю. Синтез и исследование методами математического моделирования систем управления проветриванием выемочных участков угольных шахт / О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев. - Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 1(15). - С. 65-74.

*Чередникова О. Ю., Достлев Ю. С. Исследование переходных процессов в системе управления проветриванием угольных шахт в выемочных участках минимально-фазового типа. Для автоматической стабилизации и установления желаемого режима проветривания на выемочных участках минимально-фазового типа при эффективной компенсации опасных всплесков концентрации метана относительно исходного уровня предложено использовать регулятор расхода воздуха в виде инерционного звена первого порядка. Аналитически определены оптимальные настройки регулятора расхода воздуха, при которых обеспечиваются устойчивость системы управления проветриванием участков минимально-фазового типа, желаемая точность работы системы управления, безопасный характер переходных процессов при регулировании и стабилизации режимов проветривания участков. Адекватность проведенных аналитических исследований и работоспособность предложенных систем управления проветриванием участков обоснована математическим моделированием.*

**Ключевые слова:** синтез, моделирование, система управления, концентрация метана

*Cherednikova O. Yu., Dostlev Yu. S. Investigation of transient processes in the control system of ventilation of coal mines in mining areas of the minimum-phase type. For automatic stabilization and establishment of the desired ventilation mode in mining areas of the minimum-phase type with effective compensation of dangerous surges in methane concentration relative to the initial level, it is proposed to use an air flow controller in the form of a first-order inertial link. Optimal settings of the air flow regulator are analytically determined, at which the stability of the control system for ventilation of sections of the minimum-phase type, the desired accuracy of the control system, the safe nature of transient processes during the regulation and stabilization of the modes of ventilation of the sections are ensured. The adequacy of the analytical studies and the performance of the proposed ventilation control systems are substantiated by mathematical modeling.*

**Key words:** synthesis, modeling, control system, methane concentration.

Статья поступила в редакцию 12.04.2021  
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.

### Об авторах

**Аноприенко Александр Яковлевич** (1957 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры и заведующий кафедрой компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий, ректор Донецкого национального технического университета

**Багаев И. В.** -Gram Games Limited, W6 0LE, United Kingdom.

**Бизянов Евгений Евгеньевич** - доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Специализированные компьютерные системы» Донбасского государственного технического института, ЛНР.

**Бугаева Татьяна Ивановна** - кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры инженерной и компьютерной педагогики Донецкого национального университета.

**Гранкина Ольга** - ведущий инженер-программист АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, г. Москва, Российская Федерация.

**Гранкина Татьяна** – сотрудник МКА «Кворум», г. Москва, Российская Федерация.

**Достлев Юрий Сергеевич** – старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Канищев И. С.** - Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

**Койбаш Александр Андреевич** (1995 г. р.) – ассистент кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Коляда Михаил Георгиевич** - доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной и компьютерной педагогики Донецкого национального университета.

**Кулькова Ольга Владимировна** (1973 г. р.) – заместитель директора научно-технической библиотеки Донецкого национального технического университета, соискатель кафедры философии.

**Лазебная Людмила Александровна** (1967 г. р.) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Максименко Наталья Сергеевна** (1984 г. р.) – ассистент кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Неежмаков Сергей Владимирович** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Горная электротехника и автоматика им. Р. М. Лейбова» Донецкого национального технического университета.

**Немов Георгий Юрьевич** - студент группы АУПм-19 факультета КИТА Донецкого национального технического университета.

**Охапкин В. П.** – сотрудник Центра экспертно-аналитических и информационных технологий СП РФ, г. Москва, Россия.

**Павлыш Владимир Николаевич** (1948 г. р.) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры и заведующий кафедрой прикладной математики факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета, председатель Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 01.024.04, член Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 01.008.01

**Перинская Елена Владимировна** (1966 г. р.) – кандидат технических наук, ассистент кафедры прикладной математики факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета

**Погорелов Роман Николаевич** - старший преподаватель кафедры «Специализированные компьютерные системы» Донбасского государственного технического института, ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», ЛНР.

**Привалов Максим Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия.

**Приходченко Екатерина Ильинична** (1950 г. р.) – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры социологии и политологии социально-гуманитарного института Донецкого национального технического университета, заслуженный учитель Украины, академик Международной академии наук педагогического образования.

**Ромасевич Павел Владимирович** - кандидат технических наук, доцент, доцент ФГАОУ «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Российская Федерация;

**Сидоров Константин Андреевич** – ассистент кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Скобцов Вадим Юрьевич** - кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси.

**Скобцов Юрий Александрович** – доктор технических наук, профессор, профессор Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия.

**Смирнова Е. В.** – сотрудник ООО «Д-Линк Трейд», г. Москва, Российская Федерация.

**Ткаченко Анна Евгеньевна** - кандидат технических наук, доцент кафедры «Горная электротехника и автоматика им. Р. М. Лейбова» Донецкого национального технического университета.

**Чередникова Ольга Юрьевна** (1972 г. р.) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

**Шатров А. В.** - Кировский государственный медицинский университет, г. Киров, Россия.

**Шевчук Оксана Александровна** - ассистент кафедры «Специализированные информационные технологии и системы» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

**Требования к статьям,  
направляемым в редакцию научного журнала  
«Информатика и кибернетика»**

Редколлегией принимаются к рассмотрению статьи, в которых рассматриваются важные вопросы в области информатики и кибернетики. Научный журнал издаётся с 2015 года, периодичность издания – 4 раза в год.

В журнале предусмотрены следующие рубрики:

- информатика и вычислительная техника;
- компьютерные и информационные науки;
- инженерное образование.

В соответствии с номенклатурой специальностей научных работников МОН ДНР первые две рубрики соответствуют следующим укрупненным группам специальностей научных работников:

- 05.01 – «Инженерная геометрия и компьютерная графика»,
- 05.13 – «Информатика, вычислительная техника и управление».

С 01.02.2019 Научный журнал включён в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (приказ МОН ДНР № 135) по группам специальностей 05.01.00 и 05.13.00.

Рубрика «Инженерное образование» предназначена опубликования сотрудниками научно-методических статей.

Журнал также включён в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 425-07/2016 от 14.07.2016).

Статьи, представляемые в данный сборник, должны отвечать следующим требованиям. **Содержание статьи** должно быть посвящено актуальным научным проблемам и включать следующие необходимые элементы:

- постановку проблемы в общем виде, её связь с важными научными и практическими задачами;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых решается данная задача и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья;
- формулировка цели статьи и постановка задач, решаемых в ней;
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы и перспективы последующих исследований в данном направлении.

Каждый элемент должен быть выделен соответствующим названием раздела, например, «введение», «постановка задачи», «цель и задачи работы», «цель статьи», «цель исследования», «цель разработки», «анализ ... », «сравнительная оценка ... », «разработка ... », «проектирование ... », «программная реализация», «тестирование ... », «полученные результаты», «выводы», «литература». Разделы «введение», «выводы», «литература» являются **обязательными**. Включать в названия разделов нумерацию не разрешается.

В основном тексте статьи формулируются и обосновываются полученные авторами утверждения и результаты. Выводы должны полностью соответствовать содержанию основного текста. Языки публикаций: русский, английский.

**Объём статьи, формат страницы**

Для оформления статьи следует использовать листы формата А4 (210x297 мм) с полями по 2,5 см со всех сторон. Нумерацию страниц выполнять не нужно.

Рекомендуемый объём статьи – 6-12 страниц. Рукописи меньшего объёма могут быть рекомендованы к публикации в качестве коротких сообщений.

Последняя страница текста статьи должна быть заполнена не менее чем на две трети.

но содержать не менее трёх пустых строк в конце.

#### ***Форматирование текста***

Подготовка статьи осуществляется в текстовом редакторе Microsoft Office Word.

Весь текст статьи оформляется шрифтом Times New Roman 10 пт с одинарным междустрочным интервалом, если ниже в требованиях не сказано иного. Абзацный интервал «перед» – 0 пт, «после» – 0 пт.

На первой строке с выравниванием по левому краю располагается УДК.

Заголовок (название) статьи оформляется шрифтом Times New Roman 14 пт, полужирное начертание, с выравниванием по центру (без абзацных отступов). Заголовок статьи следует печатать с прописной буквы без точки в конце, переносы слов не допускаются. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

После названия статьи следует информация об авторах, которая выравнивается по центру (без абзацных отступов). На одной строке указываются инициалы и фамилии всех авторов через запятую. Между двумя инициалами ставится пробел. С новой строки указывается название вуза (организации) и город (для каждого автора, если не совпадают). На следующей строке указываются адреса электронной почты (один адрес либо каждого автора – по желанию). Адрес электронной почты оформляется в виде гиперссылки.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Заголовок «Аннотация» выделяется полужирным начертанием. Объём аннотации – 450-550 символов (без пробелов). Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт.

Основной текст статьи разбивается на две колонки шириной по 7,5 см (промежуток между столбцами – 0,99 см), выравнивается по ширине. Абзацный отступ первой строки – 1 см. Автоматический перенос слов не применяется.

Заголовки разделов выполняются шрифтом Arial 10 пт, полужирное курсивное начертание. Абзацный отступ отсутствует, интервал перед абзацем – 12 пт, после абзаца – 6 пт. Для заголовка «Введение» установить интервал «перед» – 0 пт, «после» – 6 пт.

#### ***Таблицы в тексте статьи***

Название следует помещать над таблицей с абзацного отступа (1 см) в формате: слово «Таблица», пробел, номер таблицы, пробел, тире, пробел, название таблицы. Название таблицы записывают с прописной буквы без точки в конце строки и выравнивают по ширине. В ячейках таблицы устанавливается выравнивание текста по центру по вертикали. По горизонтали текст выравнивается по центру либо по левому краю. Границы ячеек таблицы должны быть только чёрного цвета, толщина линии – 1 пт. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте статьи, при ссылке следует писать слово «табл.» с указанием её номера, например, «... данные приведены в табл. 5». Таблицы нумеруются в пределах статьи. Таблица располагается сразу после ссылки на неё, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же таблица не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью таблицы, ширина которой превышает ширину колонки. В этом случае таблица и её название размещаются по центру страницы. Таблица не должна выступать за границы полей страницы. Таблица и её название отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после.

#### ***Рисунки в статье***

Ссылки на иллюстрации по тексту статьи обязательны и оформляются в виде «... на рис. 2» и т. п. Рисунок и его подпись выравниваются по центру колонки (без абзацных отступов), положение рисунка – «в тексте». Размещается рисунок после его первого упоминания в тексте, если это возможно (например, после окончания абзаца). Если же иллюстрация не помещается на текущей странице, то она должна быть расположена в начале следующей страницы (или колонки). При необходимости допускается включение в статью рисунка, ширина которого превышает ширину колонки. В этом случае рисунок и его подпись выравниваются по центру страницы. Иллюстрация не должна выступать за границы полей страницы. Подпись рисунка оформляется в формате: слово «Рисунок», пробел, номер

иллюстрации, пробел, тире, пробел, название рисунка. Название рисунка записывают с прописной буквы без точки в конце строки. Для подписи иллюстрации применяют курсивное начертание. Иллюстрация и её подпись отделяются от основного текста статьи одной пустой строкой до и после. Не допускается выполнять рисунки с помощью встроенного графического редактора Microsoft Office Word. Если на иллюстрации имеется текст, размер шрифта должен быть не менее чем аналогичный текст, набранный шрифтом Times New Roman 10-го размера. Иллюстрация не должна содержать много незаполненного пространства.

### **Формулы**

Формулы и уравнения рекомендуется набирать с использованием MathType (предпочтительно) или MS Equation. Формулы и математические символы не должны существенно отличаться по размеру от основного текста. Обязательной является нумерация формул, на которые имеется ссылка в тексте статьи. Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например, «... согласно формуле (2)». Формулы размещаются по центру колонки, а их номера – по правому краю. Как для строки с формулой, так и для первой строки пояснений (при наличии), абзацный отступ убирается. Первая строка пояснения начинается со слова «где», после которого следует поставить табуляцию на 1 см, затем само пояснение в формате: символ, подлежащий объяснению, пробел, тире, пробел, поясняющий текст, запятая, обозначение единицы измерения физической величины. Пояснения перечисляются через точку с запятой, выравниваются по ширине. Вторая и последующие строки пояснений начинаются с абзацного отступа (1 см). Весь блок текста, связанный с формулой (только формула, несколько формул подряд или формула с пояснениями), отделяется от основного текста одной пустой строкой до и после. Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак «×». Формулы и математические уравнений могут быть записаны в тексте документа, если их высота не превышает высоту строки. При этом следует учитывать, что знаки математических операций отделяются от чисел или символов пробелами с обеих сторон. Например, «Если учесть, что  $y < 0$  и  $2x + y = 1$ , то из формулы (3) можно выразить  $x...$ ». К символам, которые приведены в формуле, при дальнейшем их употреблении (в том числе в пояснениях к формуле) должно применяться курсивное начертание. При этом к любым числам (верхние и нижние индексы, содержащие цифры и т. п.), а также к математическим знакам курсивное начертание не применяется. Не допускается вставлять формулы, выполненные в виде рисунков.

### **Перечисления: оформление списков**

Основной текст статьи может содержать перечисления, оформленные в виде маркированного списка. В качестве маркера элемента списка разрешается использовать только короткое тире «–». Каждый элемент перечисления записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После символа короткого тире текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые строки располагается без отступов. Нумерованные и многоуровневые списки включать в статью не разрешается.

### **Литература**

В тексте статьи обязательны ссылки на все литературные источники, номер источника указывается в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуемое количество источников, на которые ссылается автор, не менее 10. Перечень источников приводится в порядке их упоминания в статье. Библиографическое описание каждого литературного источника оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018. Перечень литературных источников оформляется в виде нумерованного списка. В качестве маркеров элементов списка используют порядковые арабские цифры с точкой. Каждый источник представляет собой отдельный элемент перечисления, записывается с новой строки с абзацного отступа, равного 1 см. После порядкового номера с точкой текст располагается с отступом в 1,5 см от левой границы строки, выравнивается по ширине, при переносе на новые

строки располагается без отступов.

В конце статьи обязательно приводятся аннотации на русском и английском языках, каждая заканчивается перечнем 5-6 ключевых слов.

К тексту аннотации применяется курсивное начертание, с выравниванием по ширине, отступы слева и справа по 1 см. Слово «Аннотация» опускается. Текст аннотации начинается с ФИО авторов и названия статьи, выделяемых полужирным начертанием. Аннотация на русском языке совпадает с аннотацией, приведенной в начале статьи. В тексте аннотации на английском языке после фамилии автора указывается только первая буква имени с точкой. Абзацный интервал «перед» – 12 пт, «после» – 12 пт. Ключевые слова оформляются с новой строки аналогично тексту аннотации. Заголовок «Ключевые слова:» (англ. «Keywords:») выделяется полужирным начертанием. Ключевые слова перечисляются через запятую.

#### ***Порядок представления статьи и сопроводительные документы***

В редакцию необходимо представить:

- файл с текстом статьи;
- файл, содержащий фамилию, имя и отчество авторов полностью; ученую степень, ученое звание; место работы с полным указанием должности, подразделения и наименования организации, города (страны); номера телефонов и e-mail для связи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи, подписанное руководителем и заверенное печатью организации, в которой работает автор статьи;
- выписка из заседания кафедры или письмо организации с просьбой об опубликовании и указанием, что изложенные в статье результаты ранее не публиковались.

Статьи и сопроводительные документы следует высылать на электронный адрес [infcyb.donntu@yandex.ru](mailto:infcyb.donntu@yandex.ru).

#### ***К сведению авторов***

Если статья оформлена с нарушением указанных выше требований и правил, редакция после предварительного рассмотрения может отклонить статью.

На рецензирование статьи направляются членам редакционной коллегии журнала. Все статьи публикуются при наличии положительной рецензии.

В статью могут быть внесены изменения редакционного характера без согласования с автором. Ответственность за содержание статьи и качество перевода аннотаций несут авторы.

Публикация статей в научном журнале «Информатика и кибернетика» осуществляется на некоммерческой основе.

Все номера Научного журнала размещаются на сайте <http://infcyb.donntu.org/>.

CONTENT

**Welcome speech of the Rector of the Donetsk National Technical University Anoprienko Alexander Yakovlevich to the participants and guests of the XII International Scientific and Technical Conference "Informatics, Control Systems, mathematical and Computer Modeling - 2021"**  
*Anoprienko A. Ya.*.....5

**Congratulations to DonNTU on the 100th anniversary from graduates of the CST Faculty Olga and Tatiana Grankin**  
*Grankina O. O., Grankina T. O.*.....8

**Congratulations to DonNTU on the 100th anniversary from graduates of the CST Faculty 1999 y. Privalov M.**  
*Privalov M. V.* .....11

Informatics and computer engineering

**Regularities in the development of inertial sensors of information and computer infrastructure**  
*Anoprienko A., Koibash A., Maksimenko N., Sidorov K.* .....14

**Experience in international data analysis competitions as a way of stimulating learners' research skills**  
*Bagaev I. V., Kanishchev I. S., Okhapkin V. P., Shatrov A. V.* .....22

**Fuzzy artificial neural network without rules in the control system of a water treatment by electromagnetic field**  
*Bizyanov Y. Y., Pogorelov R. N.* ..... 34

**Mathematical modeling and analysis of the parameters of the process of pneumatic treatment of a coal seam**  
*Lazebnaya L. A.* .....39

**Full-scale model of the mine ventilation network for the implementation of the automated control system for the technological process of mine ventilation**  
*Neezhmakov S., Tkachenko A, Nemov G.* .....45

**Mathematical modeling and automation of control over the process of dynamic action on multicomponent masses**  
*Perinskaya E.* ..... 53

**Search key points for facial emotion recognition task**  
*Semenova A. P., Pavlysh V. N.* ..... 59

**Analysis of telemetry data and reliability of small satellites**  
*Skobtsov V. Yu.* ..... 65

Computer and information science

**Using geometric interpolants to numerically solve the Laplace equation in a rectangle**  
*Shevshuk O. A.* .....74

Engineering education

<b>Control the complexity of the presentation of educational material in the classroom on the basis of a computer model of fuzzy sets</b> <i>Koliada M. G., Bugayova T. I.</i> .....	81
<b>Modern information technologies in the resource support of the scientific and technical library of the university</b> <i>Prikhodchenko E.I., Kulkova O. V.</i> .....	90
<b>Training of network technologies specialists based on D-Link educational product in conditions of innovative development of Donbass</b> <i>Romasevich P. V., Smirnova E. V.</i> .....	96
<b>From genetic algorithms to metaheuristics</b> <i>Skobtsov Yu. A.</i> .....	100
<b>Investigation of transient processes in the control system of ventilation of coal mines in mining areas of the minimum-phase type</b> <i>Cherednikova O. Yu., Dostlev Yu. S.</i> .....	108
<u>About Authors</u> .....	115
<u>Requirements to articles which are sent to the editors office of the scientific journal "Informatics and Cybernetics"</u> .....	117

Электронное периодическое издание

Научный журнал

ИНФОРМАТИКА И КИБЕРНЕТИКА

(на русском, английском языках)

№ 1 -2 (23 - 24) - 2021

Ответственный за выпуск Р. В. Мальчева

Технический редактор Р. В. Мальчева

Компьютерная верстка Р. В. Мальчева

Подписано к выпуску 22.04.2021. Усл. печ. лист. 14,2. Уч.-изд. лист. 9,95.  
Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУ ВПО «ДонНТУ»,  
4-й учебный корпус, к. 36., ул. Кобозева, 17.  
Тел.: +38 (062) 301-07-35, +38 (071) 334-89-11  
E-mail: infcyb.donntu@yandex.ru, URL: <http://infcyb.donntu.org>