

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№1(9)
2020

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО- ПРИБОРОСТРОЕНИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2020

Главный редактор
Копп В.Я., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Заместитель главного редактора
Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Научный редактор
Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Ответственный секретарь
Майстришин М.М., к.т.н.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия
Пашков Е.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Скатков А.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Песчанский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Рзаев Р.Р., д.т.н., проф.
(г. Баку)
Прейс В.В., д.т.н., проф.
(г. Тула)
Кристал М.Г., д.т.н., проф.
(г. Волгоград)
Дьяченко В.А., д.т.н., проф.
(г. Санкт-Петербург)
Волков А.Н., д.т.н., проф.
(г. Санкт-Петербург)
Доронина Ю.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Качур С.М., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Васютенко А.П., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Круговой А.Н., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Скидан А.А., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Заморёнов М.В., к.т.н.
(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

- Круговой А.Н.** Автоматизированное управление двигателями постоянного тока в условиях повышенного гидростатического давления 3
Карлов А.Г. Проблемы, ресурсы и альтернативы подготовки магистров инновационного проектирования техники и технологий 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Бохонский А.И., Майстришин М.М.** Оптимальное переносное движение объекта с упругими связями 19
Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В., Владимирова Е.С. Моделирование процесса функционирования облачной системы хранения данных методом траекторий 28
Крамарь В.А., Путин А.Н., Токарев Д.А., Кабанов А.А. Алгоритмы технического зрения для управления движениями антропоморфных манипуляторов 40
Крамарь В.А., Крамарь О.А., Путин А.Н. Решение прямой задачи кинематики для антропоморфных манипуляторов 50
Кристал М.Г., Горелова А.Ю., Суриков А.А. Экспериментальное определение угла сдвига фаз между колебаниями двухкомпонентного вибропривода 60
Заморёнов М.В., Пичугова Т.Б. Аналитическое моделирование процесса функционирования эволюционирующей системы при качественном изменении характеристик ее элементов 66

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Васютенко А.П., Волошина Н.А.** Исследование пневматического преобразователя типа «сопло-приемный канал» 73

БИОМЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Пашков Е.В., Калинин М.И.** Анатомически адаптируемый ранорасширитель для малоинвазивного вертебрологического операционного вмешательства 82
Заморёнова Д.В., Гутник С.А., Заморёнов И.М. Оценка воздействия на человека электромагнитного излучения сверхвысокой частоты методом газоразрядной визуализации 88
Салманов Ф.М. Формирование карты оценки интенсивности вегетации с применением нечёткого анализа 97

УДК 621.3

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯМИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО
ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Круговой А.Н.

***Аннотация.** При управлении двигателями постоянного тока в условиях повышенного гидростатического давления возникает задача устранения вредного воздействия среды погружения, особенно морской воды, на рабочие элементы привода. Одним из вариантов решения этой задачи является размещение двигателя в нейтральной среде, например, глицерине с использованием компенсаторов давления. При погружении на большие глубины температура среды может изменяться почти в десять раз, при этом вязкость глицерина изменяется в несколько раз и существенно влияет на механическую характеристику двигателя. Для компенсации изменения вязкостного трения предлагается использовать замкнутую систему регулирования с отрицательной обратной связью по скорости, которая повышает напряжение, прикладываемое к якорной цепи при увеличении вязкостного трения. Выполнено моделирование процессов, происходящих в приводе и разработан алгоритм системы управления.*

***Ключевые слова.** Двигатель постоянного тока, гидростатическое давление, замкнутая система, вязкостное трение, угловая скорость.*

При разработке электромеханических устройств, которые должны работать при внешнем давлении до 150 бар (например, приводы управляемых подводных аппаратов [1,2], приводы дыхательных систем) целесообразно использовать двигатели постоянного тока, которые отличаются высокой удельной мощностью и малыми габаритами [3]. Существует два принципиально разных подхода при создании таких аппаратов. При первом подходе двигатель располагают в герметичном корпусе, а герметизацию вала осуществляют с помощью уплотнений, толщина стенки корпуса должна выдерживать все гидростатическое давление. При этом возникающий натяг в уплотнениях создает большой момент сопротивления. При втором подходе двигатель помещают в жидкую среду, отличающуюся малой окислительной способностью и высоким электрическим сопротивлением, например глицерин.

Разработанный привод постоянного тока изображен на **Рис.1**.

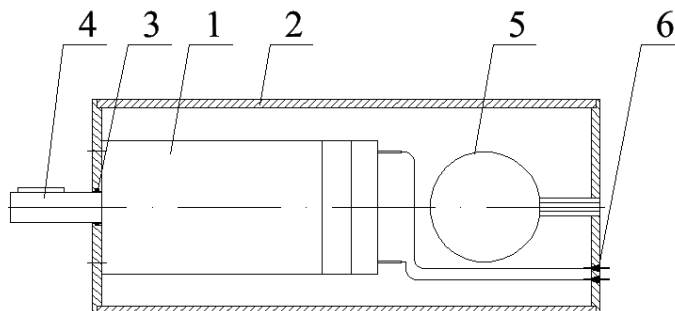


Рис.1 – Схема электропривода постоянного тока

Классический коллекторный двигатель постоянного тока 1 [4], помещается внутри тонкостенного корпуса 2, заполненного глицерином. В задней части корпуса располагается компенсатор давления 5 в виде упругой оболочки. Внутри компенсатора находится среда погружения (морская вода). Для исключения попадания морской воды внутрь двигателя через выходной вал 4 используется уплотнение 3, которое не создает значительного момента сопротивления, так как давления с обеих сторон уплотнения всегда одинаковы за счет компенсации давлений. Подключение двигателя и датчика скорости осуществляется через герметичные разъемы 6.

Практически доказано, что при погружении коллекторного двигателя в глицерин искрение на коллекторе прекращается и улучшаются условия отвода тепла, что обеспечивает длительную работу двигателя даже при двукратных перегрузках.

Были проведены экспериментальные исследования, доказавшие возможность использования такого привода при давлении до 15 МПа, при этом никакого усиления конструктивных элементов не потребовалось. Отсутствие окислительного воздействия глицерина на элементы двигателя доказано путем погружения в течение одного года.

Для описания динамики вала двигателя используется уравнение вращательного движения [5]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c - k\omega,$$

где J – приведенный к валу двигателя момент инерции, ω – угловая скорость вала двигателя, M – активный момент двигателя, M_c – приведенный момент сопротивления, создаваемый нагрузкой, $k\omega$ – момент от сил вязкостного трения, создаваемый при вращении якоря в глицерине.

При вращении якоря в воздухе вязкостное трение обычно не учитывают ввиду его малости, но при вращении в жидкой среде это трение необходимо учитывать. Необходимо также помнить, что температура морской воды может изменяться от 2 до 30°, при этом вязкость глицерина существенно изменяется (почти в 15 раз) [6].

Целью исследования является разработка методов автоматизированного управления двигателем постоянного тока, погруженного в глицерин при изменении температуры для обеспечения заданной угловой скорости вала электродвигателя.

Для примера рассмотрим двигатель постоянного тока ДП125 [7] с техническими характеристиками: номинальный момент 0,29 Нм, номинальная мощность 90 Вт, номинальное напряжение 48 В, номинальная частота вращения, 3000 об/мин, номинальный ток якоря 3,5 А.

Процессы, происходящие в электрических цепях ДПТ, могут быть описаны известным уравнением

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt},$$

где: U – напряжение, приложенное к якорной цепи; E – э.д.с. двигателя; $R_{\text{я}}, I_{\text{я}}, L_{\text{я}}$ – активное сопротивление, ток и индуктивность якорной цепи.

Без учета вязкостного трения и момента сопротивления, равном 0,1 от номинального момента графики угловой скорости и тока якоря имеют вид, изображенный на **Рис.2**.

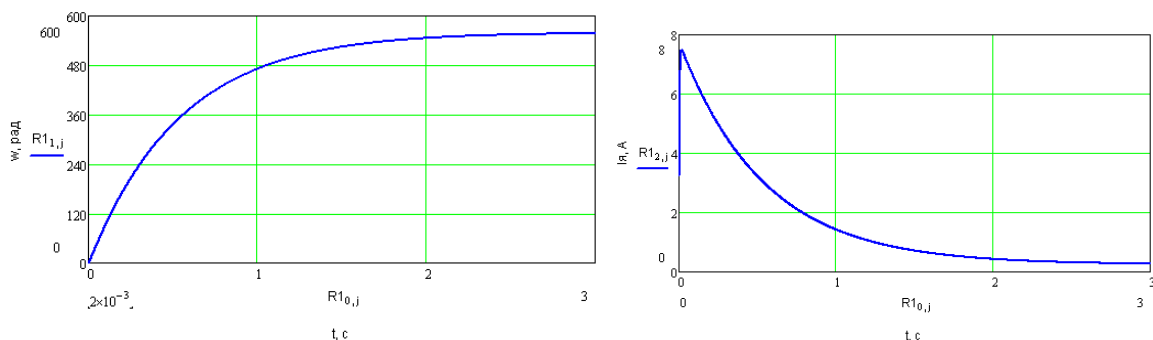


Рис.2 – Графики угловой скорости (слева) и тока якоря (справа) без учета вязкостного трения

На **Рис.3** приведены аналогичные графики при $k=0,00025$, что приблизительно соответствует температуре воды около 30°C.

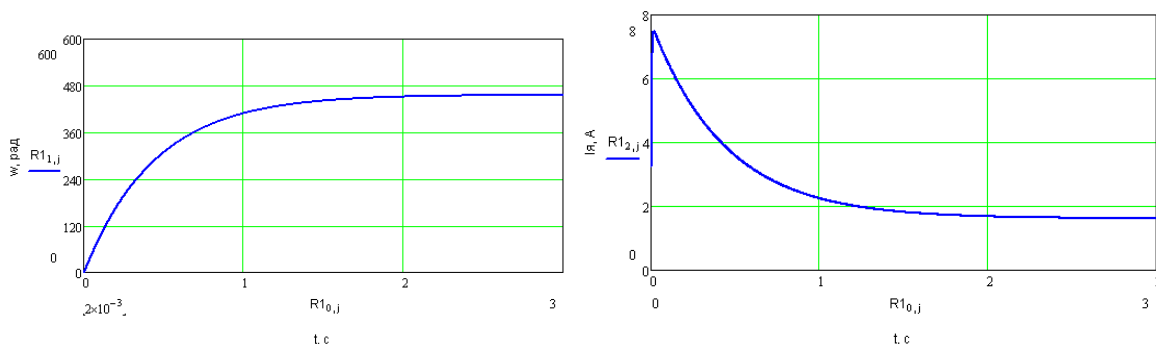


Рис.3 – Графики угловой скорости (слева) и тока якоря (справа) с учетом вязкостного трения и температуре 30°C

На **Рис.4** представлены аналогичные графики при $k=0,0025$, что приблизительно соответствует температуре воды 4°C .

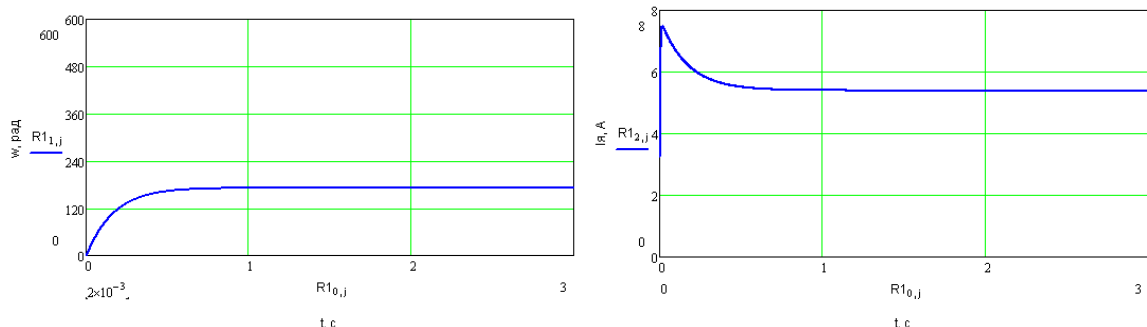


Рис.4 – Графики угловой скорости (слева) и тока якоря (справа) с учетом вязкостного трения и температуре 4°C

Компенсировать потери угловой скорости при понижении температуры можно за счет повышения напряжения. Для этого предлагается использовать замкнутую систему регулирования скорости с датчиком скорости, структурная схема которой изображена на **Рис.5**, а алгоритм работы – на **Рис.6**.

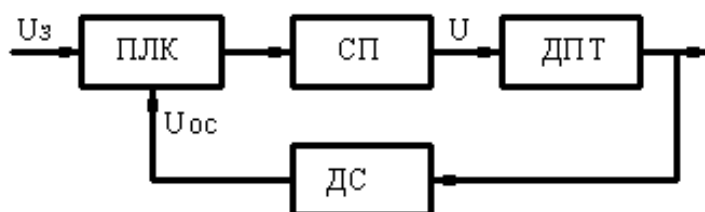


Рис.5 – Структурная схема замкнутой системы, где U_z – задающее напряжение (пропорциональное требуемой угловой скорости), ПЛК – программируемый логический контроллер, СП – силовой преобразователь, U – напряжение, прикладываемое к якорной цепи, ДС – датчик угловой скорости, $U_{ос}$ – напряжение обратной связи.

Если угловая скорость не достигла заданного значения, то происходит увеличение напряжения, а если превысила – то уменьшение. Графики угловой скорости и тока якоря в замкнутой системе при $k=0,002$ представлены на **Рис.7**.

Таким образом, заданная угловая скорость в замкнутой системе достигается всегда, независимо от температуры морской воды. При длительной работе двигателя происходит тепловыделение и температура повышается, при этом изменения угловой скорости компенсируется автоматически.

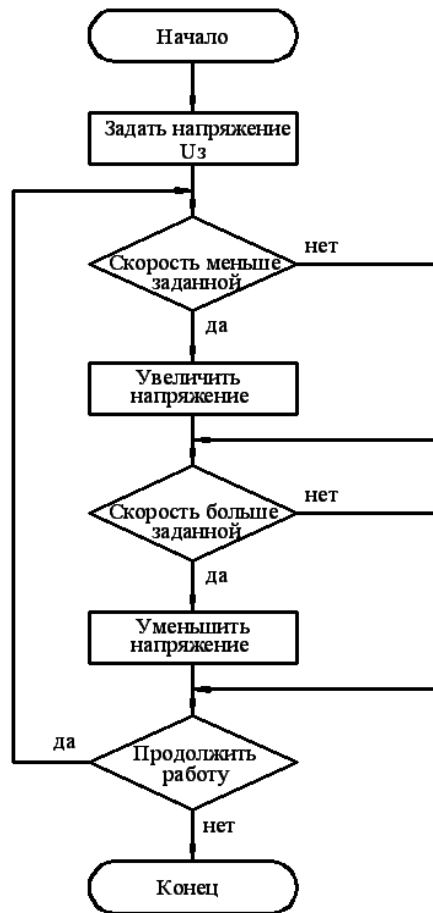


Рис.6 – Алгоритм регулирования напряжения

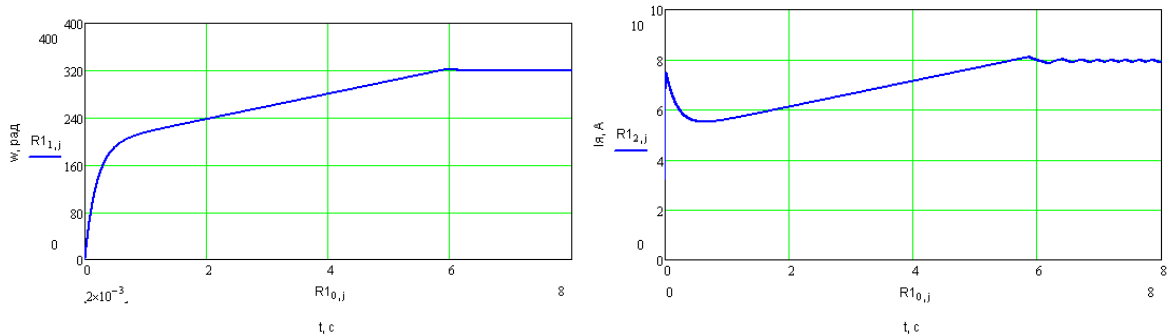


Рис.7 – Графики угловой скорости (слева) и тока якоря (справа) в замкнутой системе

В дальнейшем предполагается исследовать электропривод постоянного тока с магнитной муфтой, полностью исключающий контакт вала двигателя с морской водой.

Библиографический список

1. ПАТЕНТ RU 2 466 057 C1 Электропривод подводного аппарата.
2. Отечественные движители для подводных аппаратов. Материалы из журнала "www.Korabel.ru", опубликованные в печатной версии издания 2019 №3 Компании: "Центр судоремонта "Звездочка", АО, "Винт".
3. Дементьев, Ю. Н. Проектирование электроприводов производственных механизмов. Ч. 1 : учеб. пособие / С. Н. Кладиев, Ю. Н. Дементьев .— Томск : Изд-во ТПУ, 2013.
4. Пашков Е.В. Автоматизация в промышленности: Практикум. В 4 ч. Ч. III. Автоматизированный электропривод и моделирование механотронных модулей движения/ Е.В. Пашков [и др.]. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 225 с.
5. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов – М.: РАСХН. 2003. –320 с., ил.
6. Физические свойства глицерина: плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость: [сайт]. URL:<http://thermalinfo.ru/svoystva-zhidkostej/organicheskie-zhidkosti/fizicheskie-svoystva-glitsierina-plotnost-vyazkost-teplopr>
7. Справочник по электрическим машинам: в 2 т./ Под. общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

Bibliograficheskiy spisok

1. PATENT RU 2 466 057 C1 Elektroprivod podvodnogo apparata.
2. Otechestvennye dvizhiteli dlay podvodnish apparatov. Materiali is zhurnala "www.Korabel.ru", opublikovannie v pechatnoi versii izdaniay 2019 №3 Kompanii: "Zhentr sudoremonta" "Zvezdochka", AO "Vint".
3. Dementev U. N. Proektirovanie elektroprivodov proizvodstvennish mtshanizmov. Ch/1: Ucheb. Posobie/ S. N. Kladiev, Tomskii politesh. U. N. Dementev.— Tomsk: Izd-vo TPU, 2013
4. Pahkov E.V. Avtomatizazia v promihlennosti: Praktikum. V 4 h. h. III. Avtomatizirovannii elektroprivod i modelirovanie mehanotronnih modulei dvigenia/ E.V. Pahkov, A.N. Krugovoi, V.A. Kramar, L.L. Belaeva, V.V. Alhakov; pod. red. E.V. Pahkova. – Sevastopol: CevNTU, 2011. – 225 s., il.
5. Onitzhenko G.B. Elektricheskii privod. Uchebnik dlay vuzov – M/: RASSHN. 2003. – 320 s., il.
6. Fizicheskie svoystva glicerina: plotnost', vyazkost', teploprovodnost', teploemkost': [sajt]. <http://thermalinfo.ru/svoystva-zhidkostej/organicheskie-zhidkosti/fizicheskie-svoystva-glitsierina-plotnost-vyazkost-teplopr>
7. Spravochnik po elektricheskim mashinam: v 2 t. Pod. Obtz. Red. I.P. Kopilova, B. K. Klokova.—M.: Energoatomizdat, 1988.

*Круговой Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц.,
atpp_krugovoi@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет*

AUTOMATED CONTROL OF DC MOTORS UNDER HIGH HYDROSTATIC PRESSURE

A.N. Krugovoy

When controlling DC motors under high hydrostatic pressure, the problem arises of eliminating the harmful effects of the immersion environment, especially sea water, on the operating elements of the drive. One solution to this problem is to place the engine in a neutral environment, such as glycerine, using pressure compensators. When diving to great depths, the temperature of the medium can change almost ten times, while the viscosity of glycerol changes several times and significantly affects the mechanical characteristics of the engine. To compensate for changes in viscous friction, it is proposed to use a closed control system with negative feedback on speed, which increases the voltage applied to the anchor chain when the viscous friction increases. Modeling of processes occurring in nature is performed and the algorithm of the control system is developed.

Key words: DC motor, hydrostatic pressure, closed system, viscous friction, angular velocity.

*Krugovoy Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent,
atpp_krugovoi@mail.ru, Russia, Sevastopol,, Sevastopol State University*

ПРОБЛЕМЫ, РЕСУРСЫ И АЛЬТЕРНАТИВЫ ПОДГОТОВКИ МАГИСТРОВ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Карлов А.Г.

***Аннотация.** Представлен анализ проблем, ресурсов, обзор и сравнение образовательных программ и опыта подготовки инженерных кадров, магистров, аспирантов, способных оперативно и эффективно включиться в процессы проектирования и внедрения инновационной техники и технологии в условиях современной высокотехнологичной промышленности и бизнеса периода интенсивного развертывания современной промышленной революции. Качественное обучение и практика применения компьютерного проектирования и моделирования, в процессе применения передовых промышленных технологий (ППТ), должно быть органически дополнено умениями и навыками применения программных продуктов, обеспечивающих автоматизацию процессов генерации изобретательских идей.*

***Ключевые слова.** Высокотехнологичная промышленность и бизнес, передовые производственные технологии, компьютерный инжиниринг, концепт инновационного проекта, цифровые модели изделий и процессов, прорывные исследования, жизненный цикл проекта, тренинг процессов генерации идей, софт поддержки изобретательского мышления.*

Понятие «инновационный процесс» обычно связывают с определенной последовательностью этапов преобразования конкретного научного знания, опирающегося на открытые законы, патентованные изобретения или ноу-хау в конкретную инновацию. При этом массово покупаемая потребителями инновационная техника или технология начинает приносить прибыль.

Такое системное развитие направлено на становление и развитие инновационной стратегической платформы деятельности компании. В качестве достаточно известных примеров можно привести Ли Гонги – Samsung Group, Тим Кук – Apple, Илон Маск – Tesla и других лидеров.

Интересен опыт становления и развития инновационной стратегической платформы международного концерна **Camozzi Group**. Инновации во всех дивизионах Camozzi Group обеспечивают процессы и действия, которые позволяют разрабатывать инновационные решения систематическим и упорядоченным образом. Лидеры концерна убеждены, что инновационный процесс может быть эффективен, если только он протекает системно и постоянно, его нельзя отделять от исследований, обучения, организационного и технологического развития и проводить без

наличия постоянного контроля со стороны специально выделенных структур [1].

Целью настоящего исследования является анализ и систематизация проблем, ресурсов, программ и альтернатив подготовки магистров инновационного проектирования техники и технологий. Такое исследование может быть полезно ВУЗам, которые строят планы перехода на программы подготовки инженерных кадров в новых условиях Индустрии 4.0. Такие инженерные кадры должны обладать компетенциями, гарантирующими процесс быстрой и эффективной адаптации к новым условиям работы современных передовых промышленных предприятий, где развиваются процессы непрерывных инноваций.

Рассмотрим проблемы и ресурсы процессов генерации инноваций. Для наглядности представим понятие «инновационный процесс» в виде традиционного «черного ящика» *процессной управленческой доктрины* [2].

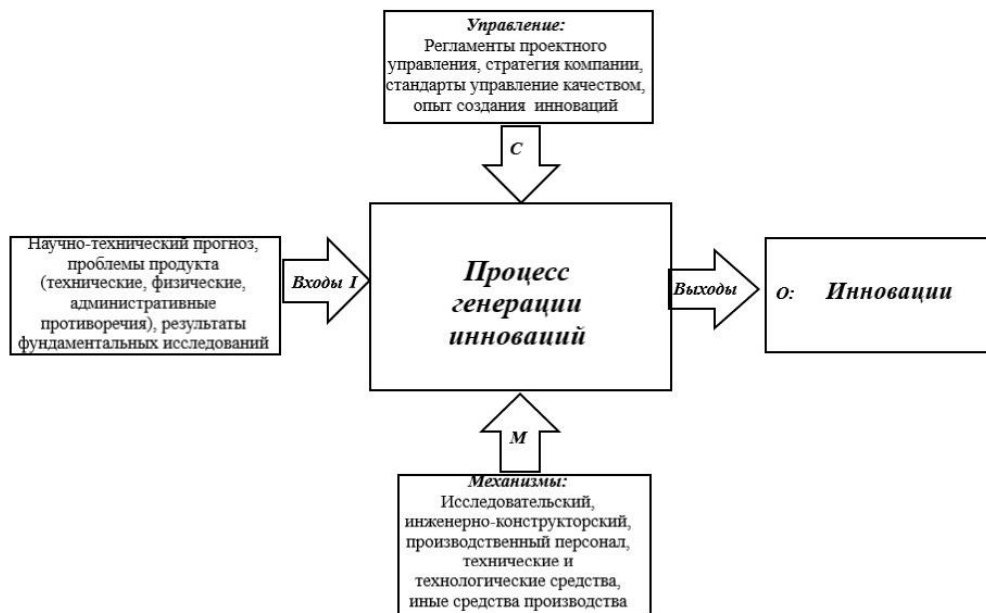


Рис.1 – Нулевой уровень системного представления процесса создания и вывода на рынок инновации

В традиционной для процессного подхода *нотации IDEF0* на **Рис.1** показано как некие «входы» преобразуются в выходные результаты [3,4]. Вводные данные в форме результатов исследования проблем бизнеса и управления, прогнозов, научных исследований и открытий, пионерных инноваций дают основание для инноваций как первичного выхода из бизнес-процесса.

Процесс не может обойтись без известных в компании особенностей управления, таких как, уровень представления процесса создания и вывода на рынок инновации формализованного прошлого опыта достижения подобных результатов: стратегий, регламентов, форм и иных предписаний.

Для реализации процесса очень важен его ресурсный базис – **механизмы**: средства исследований, квалифицированный персонал проектирования и разработки инноваций (исследовательский, инженерно-конструкторский), испытательное и производственное оборудование, информационные платформы.

Инновационные процессы в компании обычно рассматривают как совокупность взаимосвязанных этапов, функций или работ. Набор получаемых результатов автоматически приводит к выполнению корневой задачи процесса – инновации. Таким образом, *инновация* – и есть *результат процесса*. В классической методологии традиционно выделяются следующие основные этапы инновационного процесса: обеспечение результата фундаментальных исследований; получение результата прикладных исследований и ОКР; первичное освоение продукта, технологических процессов; массовое внедрение, распространение инноваций; производство и продажа устаревающих инноваций [2].

Эффективная реализация программ широкого внедрения инновационных процессов в условиях современной промышленной революции зависит от скорости и успешности подготовки инженерных кадров в большинстве технических университетов РФ, а не только в центральных, хорошо оснащенных квалифицированными преподавателями, исследователями, современными ИТ-системами и софтом, финансами.

Проблемы подготовки магистров инновационного проектирования техники и технологий состоят, прежде всего, в том, что традиции и возможности подготовки инженерных кадров в большинстве ВУЗов РФ не отвечают вызовам четвертой промышленной революции. Многим экспертам в области образования и бизнеса стало сегодня понятно, что нужны новые подходы работы со студентами и промышленными предприятиями, адекватное понимание того, какими технологиями надо владеть, чтобы работать с лучшими мировыми компаниями.

По данным признанных экспертов к современным атрибутам Индустрии 4.0 относятся: компьютерное проектирование и моделирование, включая суперкомпьютерный инжиниринг, интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект, виртуальная и дополненная реальность и еще множество субтехнологий, включая аддитивные технологии и новые материалы.

Для того, чтобы большинство выпускников инженерных ВУЗов РФ получило необходимые навыки и компетенции по использованию подобных передовых производственных технологий, нужно разрешить ряд существенных *административных противоречий*.

Необходимо подготовить будущего инженера к решению реальных проблем промышленности настоящего и будущего, которые, как правило, не решали сами преподаватели, обучающие в университете студентов. К сожалению, одна из ключевых проблем в подготовке инженеров нового

поколения состоит в том, что *большинство преподавателей, ведущих занятия в магистратуре, не работает с высокотехнологичной промышленностью много лет*. Поэтому обучение чаще проводится на примерах типовых кейсов, а не на практике решения актуальных задач высокотехнологичных компаний. Противоречие в том, что преподаватель должен развить у студента компетенции, которыми порой не владеет сам.

Подготовка магистра инновационного проектирования должна проводиться с использованием самого современного лицензионного софта и IT-систем мирового уровня. Однако реальные возможности бюджетного финансирования этой сферы у значительной части ВУЗов нашей страны крайне ограничены. Здесь противоречие в том, что выпускающие кафедры знают, что используя устаревший, но доступный софт, происходит не ускорение, а торможение скорости формирования навыков и компетенций выпускников, поскольку, начиная свою работу на современном высокотехнологичном предприятии, приходится следовать старой истине нашего классика эстрады «Пришли на завод, забудьте индукцию и дедукцию, давайте продукцию». Поэтому многие выпускники вынуждены еще долго переучиваться, уже работая, например, конструктором, технологом и приобретать те знания, умения, навыки, которые не смогли в полной мере получить в ВУЗе.

Кроме перечисленных выше проблем, следует отметить еще *низкий уровень умений и навыков изобретательского мышления выпускников* значительной части технических ВУЗов РФ. Как неоднократно подчеркивал в своих публикациях П.Г. Щедровицкий: «Каждая новая промышленная революция порождает новую технологию мышления», то есть новые подходы, новые технологии, новое образование и подготовку, новые форматы систем разделения труда». [5, 6].

А в своей публикации [7] этот же автор отметил: «Важнейшая составляющая трансформации в области содержания подготовки кадров и образования – системный подход как общий язык, метаязык, на котором разговаривают представители разных дисциплин: логика мышления, логика описания сложных систем. А уже дальше он – исследователь, ты – инженер, я – управленец, и мы можем совместно решать ту или иную задачу. Дальше – управленческий подход, разные методологии управления». Далее автор акцентирует внимание на тот факт, что на протяжении последних десяти лет наблюдается мощнейшее внедрение в образовательный процесс технологий мышления, это, например, ТРИЗ – технологии решения изобретательских задач Альтшуллера, которую используют уже в ста американских университетах. Однако количество ВУЗов РФ, где в образовательные программы включено обучение основам ТРИЗ и другим инструментам развития изобретательского мышления, на порядок меньше, чем в США.

Ресурсы подготовки магистров инновационного проектирования. Описанные выше некоторые проблемы подготовки магистров такого

направления должны стимулировать поиск, анализ и эффективное использование необходимых ресурсов для решения определенной доли этих проблем.

К таким ресурсам следует отнести: кадровые (IT-специалисты, преподаватели-практики «решатели проблем» и т.п.), методические (учебники, учебные пособия, специализированные WEB-ресурсы), организационные (новые ФГОС+++ направления «Магистр инновационного проектирования» наличие индустриальных партнеров из числа высокотехнологичных компаний), финансовые (бюджетные места для подготовки магистров такого профиля). Доступность таких ресурсов для широкого круга ВУЗов РФ позволит ускорить процесс подготовки инженерных кадров, способных решать актуальные мультидисциплинарные задачи, направленные на создание инновационной техники и технологий на уровне самых высоких мировых стандартов.

Программы подготовки магистров инновационного проектирования. Перспективную образовательную модель «Университет 4.0», разработал и применяет СПбПУ. В области передовых производственных технологий такая модель подразумевает, что у студента и аспиранта должно быть фундаментальное физико-математическое образование высокого уровня, которое он получает на младших курсах обучения в СПбПУ, а затем его дальнейшее обучение строится на участии в выполнении конкретных, как правило, наукоёмких и высокотехнологичных проектов. Для реализации этих проектов привлекаются новейшие технологии и методы мирового уровня, а результатом их выполнения становится решение наукоёмких и сложных высокотехнологических задач. В магистратуре ИППТ СПбПУ большое внимание уделяется конкретным практическим работам, которые выполняются в рамках реальных проектов, заказных НИОКР от высокотехнологичных компаний, а не на основе изучения кейсов "из прошлого". **Методика подготовки инженеров ИППТ СПбПУ была признана лучшей на V Всероссийском инженерном конкурсе «ВИК-2019»** [8,9,10]. Из многочисленных примеров успешной работы выпускников магистратуры ИППТ СПбПУ можно отметить проекты, которые инженеры ГК CompMechLab выполняют в интересах крупнейших предприятий и корпораций: BMW Group; Rolls-Royce; Boeing; Daimler; General Electric; General Motors; Tesla; LG Electronics; и др., российских компаний: госкорпорация "Ростех", госкорпорация "Росатом", НАМИ, КАМАЗ, УАЗ и многих других. Естественно, что качество выполняемых для таких заказчиков работ на уровне самых высоких мировых стандартов.

Компетенции выпускников, подготовленных на основе таких высоких мировых стандартов, позволяют решать мультидисциплинарные задачи, которые направлены на оптимизацию уже сформировавшихся патентованных идей и проектов. Такие задачи решаются достаточно быстро и качественно. Однако, при необходимости поиска нетипового решения на

стадии формирования концепта нового продукта или технологии, современные методы оптимизации не способны генерировать решения изобретательского уровня.

Примерно двадцать лет назад была поставлена задача создать программу подготовки магистров, способных быстро и успешно решать изобретательские задачи инвариантно к профилю первоначального технического образования. Один из первых в мире проектов программы подготовки Магистров Инновационного Проектирования был реализован впервые в мире в 2006 г. в Университете INSA (г. Страсбург, Франция). Научным руководителем уникальной программы «Продвинутый Мастер Проектирования Инноваций» (Advanced Master in Innovative Design) для специалистов и руководителей проектных отделов и научно-исследовательских центров с 2004 по 2009 г. был Мастер ТРИЗ из Минска Н.Н. Хоменко. Программа аккредитована международной ассоциацией вузов Conference Des Grand Ecoles. Это был первый опыт в мире в области образования, который позволил обеспечить образовательный и научный уровень Магистра Проектирования Инноваций [1].

Н.Н. Хоменко, как эксперт и тренер, принимал участие в решении множества комплексных междисциплинарных проблемных ситуаций. Среди его клиентов такие гранды мирового бизнеса, как: Samsung, LG-Electronics, Европейское аэрокосмическое агентство (EADS), Bosh-Siemens, Bombardier, European Institute for Energy Research и другие.

Альтернативы подготовки магистров инновационного проектирования. Альтернативных программ подготовки инженерных кадров, способных решать мультидисциплинарные задачи, на базе которых должны быть реализованы проекты создания лучших в мире продуктов, немало. Из достаточно известных и хорошо себя зарекомендовавших отметим только две программы, уже упомянутые выше, которые делают акцент на реализацию разных целей.

Так, если высокотехнологичной компании нужны инженерные кадры, способные эффективно реализовать анализ и оптимизацию самых сложных технических систем и технологий, то следует выбрать выпускника магистратуры ВУЗа, аналогичной **ИППТ СПбПУ**. **Такие специалисты способны** описывать и анализировать любую сложную систему, например современный станок, двигатель, автомобиль, которые описывается десятками тысяч показателей и ограничений. Используя свои умения и навыки оптимизации систем, они способны создавать продукт мирового уровня, **продукт best-in-class, лучший в классе**. При этом специалисты с такими компетенциями способны **учитывать и такие ограничения, как временные, технологические, финансовые, экологические**.

Иная альтернатива подготовки магистров предполагает программы подготовки инженерных кадров, которые способны быстрее и эффективнее конкурентов находить изобретательские решения и трансформировать их в

патенты, ноу-хау, способные стать уверенной основой для *прорывных проектов*, которые приведут после выполнения остальных этапов проекта к созданию продуктов мирового уровня, **продуктов best-in-class, лучших в классе технологий и технических систем**. Пример программы подготовки магистров с таким профилем компетенций приведен выше (Advanced Master in Innovative Design).

Выводы:

- высокотехнологичные компании, которым нужны инженерные кадры, способные эффективно реализовать анализ и оптимизацию самых сложных технических систем и технологий и создание **продукта best-in-class при наличии достаточного финансирования для реализации подобных проектов**, следует выбрать выпускника магистратуры ВУЗа, аналогичного **ИППТ СПбПУ**;
- если в стратегию компании входят планы непрерывной генерации инноваций, основанных на собственных патентах и ноу-хау, а не заимствованных у иных компаний на правах лицензий, то необходимо обращаться в ВУЗы, образовательные программы которых включают системную подготовку специалистов, имеющих компетенции решать нетиповые изобретательские решения в условиях ограниченных ресурсов времени и финансов.

Библиографический список

1. Карлов А.Г. Идеи, изобретения, инновации в сфере автоматизации технологий и технических систем: учебное пособие / А.Г. Карлов, Н.А. Шпаковский. — М.: Центркаталог, 2019. — 536 с.
2. Султанов И.А. Инновации с позиции процесса и проектов бизнеса. [Сайт] // И.А. Султанов. Инновации с позиции процесса и проектов бизнеса. URL: <http://projectimo.ru/innovatika/innovacionnyj-process.html> (10.03.2020).
3. Термины нотаций моделирования процессов. [сайт]. URL: https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/terms/terms_modeling_notations (10.03.2020).
4. Нотация IDEF0. [сайт]. URL: <https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/idef0> (10.03.2020).
5. Щедровицкий П.Г. Опережающая подготовка инженерных кадров как приводной ремень догоняющих индустриализаций России, материалы лекции в Центре НТИ СПбПУ, 27.02.2020. [сайт]. URL: <http://fea.ru/news/7258> (10.03.2020)
6. Щедровицкий П.Г. «Вызовы новой промышленной революции для университетов», материалы лекции в Центре НТИ СПбПУ, 23.05. 2018. [сайт]. URL: <http://fea.ru/news/6749> (10.03.2020)

7. Щедровицкий П. Г. Лекция в Уральском федеральном университете 12.12.2017. Почему российская экономика и образование не успевают за остальным миром. [сайт]. URL: https://www.znak.com/2017-12-12/petr_chedrovickiy_pochemu_rossiyskaya_ekonomika_i_obrazovanie_ne_uspevayut_za_ostalnym_mirom
8. «Окно возможностей открыто»: интервью А.И. Боровкова для журнала «Ритм машиностроения», 2020/№1. [сайт]. URL: <http://fea.ru/news/7264> (13.03.2020)
9. Методика подготовки инженеров ИППТ СПбПУ была признана лучшей на V Всероссийском инженерном конкурсе «ВИК-2019». [сайт]. URL: <https://nticenter.spbstu.ru/news/7179?fbclid=IwAR0RBytRcmjkb2BheTrT9XmsvbT0ajmdduNXBkg6PHbilvq8R6cNcRZk2Rw>
10. Рудской А.И. Инженерное образование: мировой опыт подготовки интеллектуальной элиты / А.И. Рудской и [др]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 216 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Karlov A.G. Idei, izobreteniya, innovacii v sfere avtomatizacii tekhnologij i tekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie / A.G. Karlov, N.A. SHpakovskij. — М.: Centr katalog, 2019. — 536 с.
2. Sultanov I.A. Innovacii s pozicii processa i proektov biznesa. [Sajt] // I.A. Sultanov. Innovacii s pozicii processa i proektov biznesa. URL: <http://projectimo.ru/innovatika/innovacionnyj-process.html> (10.03.2020).
3. Terminy notacij modelirovaniya processov. [sajt]. URL: https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/terms/terms_modeling_notations (10.03.2020).
4. Notaciya IDEF0. [sajt]. URL: <https://www.businessstudio.ru/wiki/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/idef0> (10.03.2020).
5. SHCHedrovickij P.G. Operezhayushchaya podgotovka inzhenernyh kadrov kak privodnoj remen' dogonyayushchih industrializacij Rossii, materialy lekicii v Centre NTI SPbPU, 27.02.2020. [sajt]. URL: <http://fea.ru/news/7258> (10.03.2020)
6. SHCHedrovickij P.G. «Vyzovy novoj promyshlennoj revolyucii dlya universitetov», materialy lekicii v Centre NTI SPbPU, 23.05. 2018. [sajt]. URL: <http://fea.ru/news/6749> (10.03.2020)
7. SHCHedrovickij P. G. Lekciya v Ural'skom federal'nom universitete 12.12.2017. Pochemu rossijskaya ekonomika i obrazovanie ne uspevayut za ostal'nym mirom. [sajt]. URL: https://www.znak.com/2017-12-12/petr_chedrovickiy_pochemu_rossiyskaya_ekonomika_i_obrazovanie_ne_uspevayut_za_ostalnym_mirom

8. «Okno vozmozhnostej otkryto»: interv'yu A.I. Borovkova dlya zhurnala «Ritm mashinostroeniya», 2020/№1. [sajt]. URL: // <http://fea.ru/news/7264> (13.03.2020)
9. Metodika podgotovki inzhenerov IPPT SPbPU byla priznana luchshej na V Vserossijskom inzhenernom konkurse «VIK-2019». [sajt]. URL: <https://nticenter.spbstu.ru/news/7179?fbclid=IwAR0RBytRcmjkb2BheTrT9XmsvbT0ajmdduNXBkg6PHbilvq8R6cNcRZk2Rw>
10. Rudskoj A.I. Inzhenernoe obrazovanie: mirovoj opyt podgotovki intellektual'noj elity / A.I. Rudskoj i [dr]. – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2017. – 216 s.

Карлов Антон Георгиевич, к.т.н., доцент, antkar38cam@gmail.com, Российская Федерация, г. Севастополь, ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Политехнический институт.

CHALLENGES, RESOURCES AND ALTERNATIVES PREPARATIONS MASTERS OF INNOVATIVE DESIGN OF TECHNOLOGY AND TECHNOLOGIES

A.G. Karlov

The analysis of problems, resources, a review and comparison of educational programs and the experience of training engineering personnel, masters, graduate students who are able to quickly and efficiently get involved in the design and implementation of innovative engineering and technology in the conditions of modern high-tech industry and business during the intensive deployment of modern industrial revolution. Qualitative training and the practice of applying computer-aided design and modeling, in the process of applying advanced industrial technologies (PPT), should be organically supplemented with the skills and abilities of using software products that automate the generation of inventive ideas.

Keywords: high-tech industry and business, advanced manufacturing technologies, computer engineering, concept of an innovation project, digital models of products and processes, breakthrough research, project life cycle, training of processes for generating ideas, software support for inventive thinking.

Karlov Anton Georgievich, Ph.D., the senior lecturer, antkar38cam@gmail.com, the Russian Federation, Sevastopol, the Sevastopol state university, Polytechnical institute.

УДК 519.3:05.011.56 : 621.865.8

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЕРЕНОСНОЕ ДВИЖЕНИЕ ОБЪЕКТА С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

Бохонский А.И.¹, Майстришин М.М.²

Аннотация. Исследованы колебания объекта с конечным числом степеней свободы при реверсионно сконструированном оптимальном управлении переносным движением (за минимально возможное время) из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние абсолютного покоя.

Ключевые слова. Переносное и относительное движение, упругий подвес, три степени свободы, конструируемое управление, оптимальное движение, переносный и относительный покой.

Современной теории оптимального управления посвящены работы [1 – 8]. В ряде публикаций проведены решения задач оптимального переносного поступательного и вращательного движения упругих объектов [9 – 17]. Управления (переносные ускорения) конструировались с учетом цели движения и ограничений.

При составлении уравнений относительного движения для объекта с конечным числом степеней свободы преодолевались известные трудности моделирования упругих деформаций элементов конструкции. На **Рис.1** изображен объект как абсолютно твердое тело с упругими связями (упругий подвес с тремя степенями свободы). Для описания движения использованы координаты: x_r , y_r – поступательные перемещения центра масс по оси x и y ; θ_z – угол поворота объекта вокруг оси z .

Цель исследования – выявление характерных особенностей построения математической модели относительного движения в виде дифференциальных уравнений с учетом кинематических свойств объекта и анализ относительных упругих колебаний во время переносного движения.

Конструирование оптимального переносного кососимметричного ускорения.

Представим, что ускорение основания задано (по направлению оси x) в виде кососимметричной функции [12]:

$$U_e(t) = a \sin^3(pt), \quad (1)$$

где $a, p = \text{const}$. Параметр a зависит от расстояния, на которое перемещается объект, и времени движения.

Первый интеграл от (1) записывается так:

$$V_e(t) = \int U_e(t) dt + C_1 \quad (2)$$

Второй интеграл от (2)

$$S_e(t) = \int V_e(t) dt + C_2. \quad (3)$$

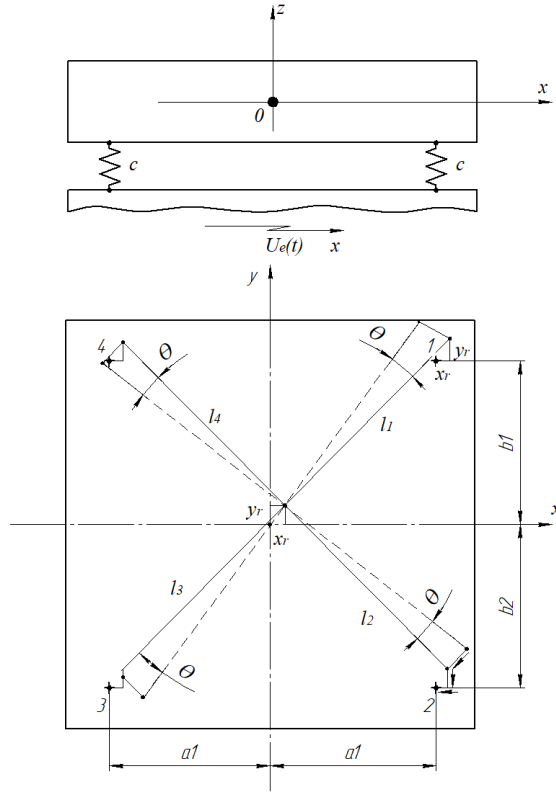


Рис.1 – Схема объекта, отражающая формирование восстанавливающих сил

Константы C_1 и C_2 , параметр a находятся с использованием краевых условий:

$$S_e(0) = 0, \quad V_e(0) = 0, \quad S_e(T) - L = 0, \quad (4)$$

где L – расстояние, на которое перемещается объект по направлению оси x . Из (4) получено:

$$C_1 = \frac{6pL}{-6pT + \sin^3(pT) + 6\sin(pT)}, \quad C_2 = 0, \quad (5)$$

$$a = \frac{9p^2L}{-6pT + \sin^3(pT) + 6\sin(pT)}.$$

С учетом (5) для кососимметричной функции принято:

$$U_e(t) = \frac{3\pi L}{T^2} \sin^3\left(\frac{2\pi}{T}t\right). \quad (6)$$

Время движения может быть выбрано с учетом периода собственных колебаний объекта или моментных соотношений в относительном движении [9]. Перемещение и скорость переносного движения:

$$V_e = \frac{L}{2T} \left(-3\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \cos^3\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + 2 \right),$$

$$S_e = \frac{L}{12\pi} \left(-\sin^3\left(\frac{2\pi t}{T}\right) - 6\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \frac{12\pi t}{T} \right). \quad (7)$$

С целью дальнейшего упрощения модели относительного движения принято, что коэффициенты жесткости в каждой связи по направлениям осей x и y одинаковы: $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c$ (кН/м). Точка крепления связи к объекту при поступательных перемещениях центра масс по направлениям осей соответственно u и v , а за счет поворота объекта вокруг оси z перемещается на $\Delta_i = l_i \theta$, где θ – угол поворота, $i = 1, 2, 3, 4$.

При составлении уравнений движения, на основании теорем о движении центра масс и теоремы об изменении главного момента количеств движения, суммируются силы упругости, обусловленные поступательными и вращательным движением. Восстанавливающие силы направлены к положению статического равновесия.

На **Рис.2** приведен пример определения перемещений Δ_{1x} и Δ_{1y} точки крепления амортизатора №1 только в связи с поворотом объекта вокруг вертикальной оси z на малый угол θ_z .

Из треугольника $\sin \alpha_1 = \frac{b_1}{l_1}$; угол между перемещениями Δ_x и Δ_{1x} равен $(90^\circ - \alpha_1)$. Теперь $\Delta_{1x} = l_1 \theta_z \cos(90^\circ - \alpha_1) = l_1 \theta_z \sin \alpha_1 = \theta_z b_1$.

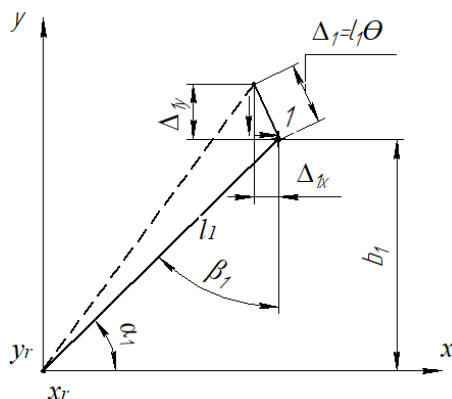


Рис.2 – Схема перемещения точки крепления в связи с вращением объекта вокруг оси z

Составляющая силы упругости по оси x направлена к точке 1 и равна $F_{1x} = c\Delta_{1x} = cb_1\theta_z$.

Для определения перемещения по оси y используется функция $\sin \beta_1 = \frac{a_1}{l_1}$, $\Delta_{1y} = \Delta_1 \cos(90^\circ - \beta_1) = l_1\theta_z \sin \beta_1 = a_1\theta_z$. Поэтому составляющая силы упругости $F_{1y} = -ca_1\theta_z$.

Аналогичные рассуждения позволяют найти составляющие силы упругости и их знаки для всех точек подвеса в связи с поворотом объекта.

Эти зависимости имеют вид:

$$\begin{aligned} F_{1x}^{ynp} &= -cx_r + cb_1\theta_z; & F_{1y}^{ynp} &= -cy_r - ca_1\theta_z; \\ F_{2x}^{ynp} &= -cx_r - cb_2\theta_z; & F_{2y}^{ynp} &= -cy_r - ca_1\theta_z; \\ F_{3x}^{ynp} &= -cx_r - cb_2\theta_z; & F_{3y}^{ynp} &= -cy_r + ca_2\theta_z; \\ F_{4x}^{ynp} &= -cx_r + cb_1\theta_z; & F_{4y}^{ynp} &= -cy_r + ca_2\theta_z. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, для сил упругости получено:

$$F_x^{ynp} = -4cx_r + 2c(b_1 - b_2)\theta_z; \quad F_y^{ynp} = -4cy_r + 2c(a_2 - a_1)\theta_z.$$

Система дифференциальных уравнений плоского оптимального относительного движения (колебаний) объекта преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x_r}{dt^2} &= -4cx_r + 2c(b_1 - b_2)\theta_z - mU_e(t), \\ m \frac{d^2 y_r}{dt^2} &= -4cy_r + 2c(a_2 - a_1)\theta_z, \end{aligned} \quad (9)$$

$$J_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -2c(a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2)\theta_z + 2cx_r(b_1 - b_2) + 2cy_r(a_2 - a_1),$$

где m – масса объекта; J_z – физический момент инерции; U_e – ускорение переносного движения объекта по направлению оси x .

В данной системе так называемыми «парциальные» частотами являются $k_1 = k_3 = \sqrt{\frac{4c}{m}}$, которые совпадают с собственными. Если необходимо переместить объект на заданное расстояние за приемлемое время, то, например, общее время движения в данном случае можно принять: $T = 2T_2$, где $T_2 = \frac{2\pi}{k_2}$.

Численный анализ выполнен при следующих исходных данных:

$c = 10 \text{ кН/м}; \quad a_1 = 0,4 \text{ м}; \quad a_2 = 0,6 \text{ м}; \quad b_1 = 0,8 \text{ м}; \quad b_2 = 1,2 \text{ м}; \quad m = 200 \text{ кг};$
 $J = 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$

Частотный определитель системы уравнений (9)

$$\begin{vmatrix} k^2 - d_1 & 0 & d_2 \\ 0 & k^2 - d_3 & d_4 \\ d_6 & d_7 & k^2 - d_3 \end{vmatrix} = 0, \quad (10)$$

где $d_1 = d_3 = \frac{4c}{m}$; $d_2 = \frac{2c(b_1 - b_2)}{m}$; $d_4 = \frac{2c(a_2 - a_1)}{m}$; $d_5 = \frac{2c(a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2)}{J}$;
 $d_6 = \frac{2c(b_1 - b_2)}{J}$; $d_7 = \frac{2c(a_2 - a_1)}{J}$.

Для принятых исходных данных из (10) следует полином:

$$k^6 - 407,74k^4 + 41870k^2 - 1,844k^5 = 0.$$

Частоты собственных колебаний равны $k_1 = 2,146 \text{ с}^{-1}$;
 $k_2 = k_3 = 14,147 \text{ с}^{-1}$, где k_1 – частота упругих крутильных колебаний; k_2, k_3 – частота поступательных колебаний по осям x и y .

Для данного объекта при движении, например, по оси x из состояния покоя ($x_r(0) = 0; \dot{x}_r(0) = 0; y_r(0) = 0; \dot{y}_r(0) = 0$) из системы (9) следует простое уравнение относительного движения:

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + k_2^2 x_r = -U_e(t), \quad (11)$$

где $U_e(t)$ – переносное ускорение, однако имеющее громоздкое выражение и поэтому здесь не приводится.

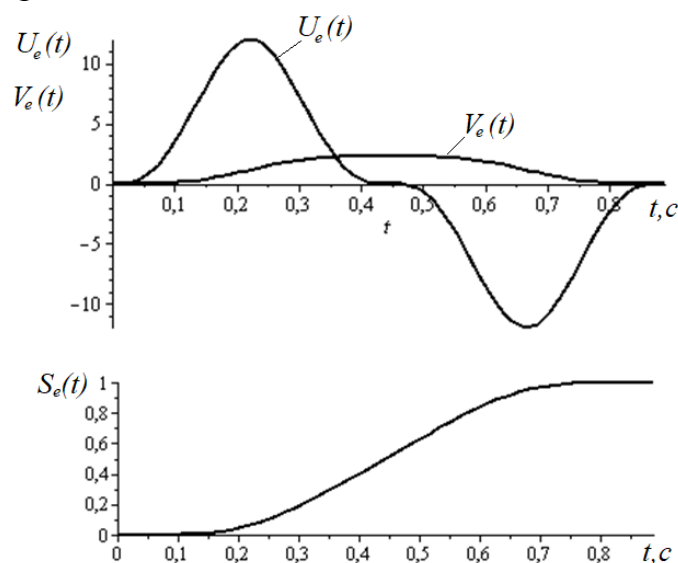


Рис.3 – Переносное движение по оси x

Графики относительного движения изображены на **Рис.4**. Из графиков следует, что при $T = 2T_2 = 0,888\text{с}$ наступает состояние абсолютного покоя.

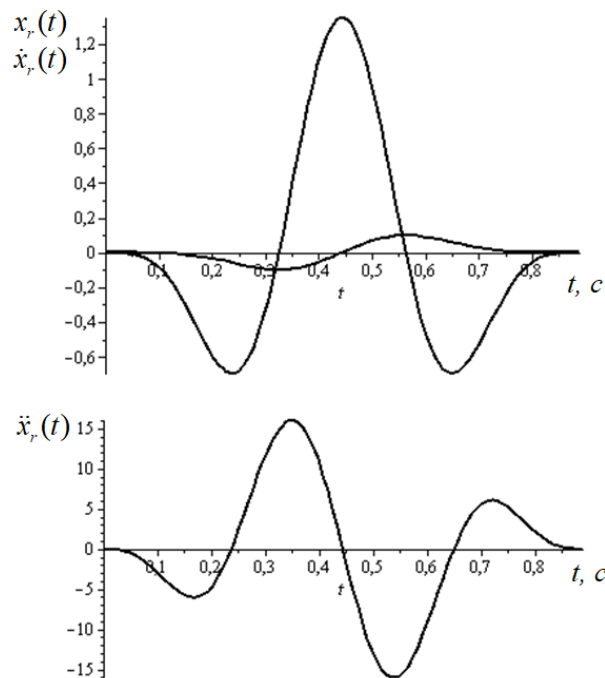


Рис.4 – Относительное движение – колебания по оси x

Выводы.

Разработана методика составления уравнений движения объекта с упругими связями, позволяющая реализовывать оптимальные кососимметричные управления для перемещения объекта из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние абсолютного покоя за приемлемое минимальное время. Методика моделирования и расчета иллюстрируется на простом примере системы с тремя степенями свободы.

Результаты исследований показывают, что новыми задачами могут выступать задачи колебаний упругих подвесов манипуляторов, которые находятся не только на вибрирующем стационарном основании, но участвуют в быстром оптимальном перемещении на заданное расстояние, либо повороте на заданный угол.

Библиографический список

1. Теория автоматического управления. Ч.II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1997. – 288 с.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

4. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А.Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 416 с.
5. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
6. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
7. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
8. Дорф Г. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Крылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
9. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
10. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
11. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления / А.И. Бохонский. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 р.
12. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
13. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 р.
14. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / A. Bokhonsky and [eds]. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 р.
15. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский // Фундаментальные основы механики: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №2. – С.38 – 41.
16. Бохонский А.И. Экстремум реверсионно восстановленного функционала оптимального перемещения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Механика, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. – №3. – С. 44 – 48.
17. Бохонский А.И. Новые задачи оптимального управления в механике / А.И. Бохонский // Научные труды факультета естественных наук. – Севастополь: СПИ, 1993. – Вып. 1. – С.42 – 48.

Bibliograficheskiy spisok

1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. CH.II. Teoriya nelinejnyh special'nyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Voronova. – M.: Vyssh. shk., 1997. – 288 s.
2. Krasovskij N.N. Teoriya upravleniya dvizheniem / N.N. Krasovskij. – M.: Nauka, 1968. – 476 s.
3. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemyh sistem: linejnye modeli / P.D. Krut'ko. – M.: Nauka, 1987. – 304 s.
4. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shk., 1982. – 416 s.
5. Troickij V.A. Optimal'nye processy kolebanij mekhanicheskikh sistem / V.A. Troickij. – L.: Mashinostroyeniye, 1976. – 236 s.
6. CHernous'ko F.L. Upravleniye kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
7. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 536 s.
8. Dorf G. Sovremennyye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop. Per. s angl. B.I. Krylova. – M.: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002. – 832 s.
9. Bohonskiy A.I. Optimal'noye upravleniye perenosnym dvizheniem deformiruemykh ob'ektov: teoriya i tekhnicheskiye prilozheniya / A.I. Bohonskiy, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevskiy; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2007. – 296 s.
10. Bohonskiy A.I. Variatsionnoye i reverzionnoye ischisleniye v mekhanike / A.I. Bohonskiy, N.I. Varminskaya; Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2012. – 212 s.
11. Bohonskiy A.I. Aktual'nye zadachi variatsionnykh ischisleniy / A.I. Bohonskiy. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
12. Bohonskiy A.I. Reverzionnyy princip optimal'nosti / A.I. Bohonskiy. – M.: Vuzovskiy uchebnyk: INFRA-M, 2016. – 174 s.
13. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
14. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / A. Bokhonsky and [eds]. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.
15. Bohonskiy A.I. Energoemkost' upravleniya peremeshcheniem ob'ektov / A.I. Bohonskiy // Fundamental'nye osnovy mekhaniki: mater. mezhdunar. nauch.-praktich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2017. – №2. – S.38 – 41.
16. Bohonskiy A.I. Ekstremum reverzionnoy vosstanovlennoy funktsionala optimal'nogo peremeshcheniya ob'ekta / A.I. Bohonskiy, N.I. Varminskaya //

Mekhanika, avtomatika i robototekhnika: mater. mezh-dunar. nauch.-praktich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2019. – №3. – S. 44 – 48.

17. Bohonskij A.I. Novye zadachi optimal'nogo upravleniya v me-hanike / A.I. Bohonskij // Nauchnye trudy fakul'teta estestvennyh nauk. – Sevastopol': SPI, 1993. – Vyp. 1. – S.42 – 48.

¹*Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, проф.,
bohon.alex@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет,*

²*Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский
государственный университет.*

CONSTRUCTION OF MANAGERIAL ACTIONS BY MOVEMENT OF OBJECTS

A.I. Bokhonsky, M.M. Maystrishin

Designed new types of optimal controls are compared by criteria - energy intensity, principle of operation and energy-action with other known controls. It is shown that purposeful design of controls does not exclude, in some cases, a decrease in energy for its implementation

Key words: optimal control, energy intensity of controls, principle of action, principle of energy action, deformable object, achieving absolute rest.

*Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor,
bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,*

*Maystrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences,
mihail.maystrishin@gmail.com Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ МЕТОДОМ ТРАЕКТОРИЙ

Заморёнов М.В.¹, Копп В.Я.², Заморёнова Д.В.³, Владимирова Е.С.⁴

Аннотация. Рассмотрен процесс функционирования облачной системы хранения данных. При использовании метода траекторий построена полумарковская модель обработки запроса на запись данных такой системой. Найдены функции распределения времен пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий. Определены функция распределения, математическое ожидание и дисперсия случайной величины – времени полной обработки запроса на запись данных. Проведено сравнение результатов моделирования с результатами, полученными по теореме о среднестационарном времени пребывания системы в подмножестве состояний.

Ключевые слова. Облачная системы хранения данных, полумарковская модель, метод траекторий, функция распределения.

В связи с бурным развитием цифровой техники на сегодняшний день информация является одним из основных стратегических ресурсов. Объем информации удваивается каждые два года [1], что является основной причиной разработки и внедрения более совершенных систем обработки и хранения данных, позволяющих обрабатывать большие объемы информации. При этом простое увеличение физической емкости хранилищ не позволяет решать проблему обработки Больших Данных [2], необходимо внедрение новых информационных технологий, таких как виртуализация, переход на облачное и гибридное хранение данных, обеспечивающее одновременно производительность, масштабируемость и необходимый уровень обслуживания для внутренних или внешних клиентов систем хранения данных (СХД). Одним из важнейших этапов создания систем является моделирование, вопросам которого и посвящена эта статья.

В статье рассматривается функционирование облачной СХД. Облачное хранилище данных (англ. Cloud Storage) – это новый метод организации хранилищ, при котором принадлежащие компании или организации данные хранятся не в ее центрах обработки данных или на одиночных серверах, а на большом количестве виртуальных серверов [3, 4, 5, 6].

Блочная система хранения данных предоставляет вычислительным системам доступ на уровне блоков к томам хранения данных. В этой среде файловая система создается на базе вычислительных систем, а доступ к данным осуществляется через сеть на уровне блоков. Блочная система

хранения состоит из одного или нескольких контроллеров и системы хранения. В свою очередь контроллер системы хранения данных состоит из трех ключевых компонентов: клиентский интерфейс (внешние порты и контроллеры), кэш-память и серверная часть. Структура интеллектуальной системы хранения блочного типа приведена на **Рис.1**, подробное описание дано в [7].

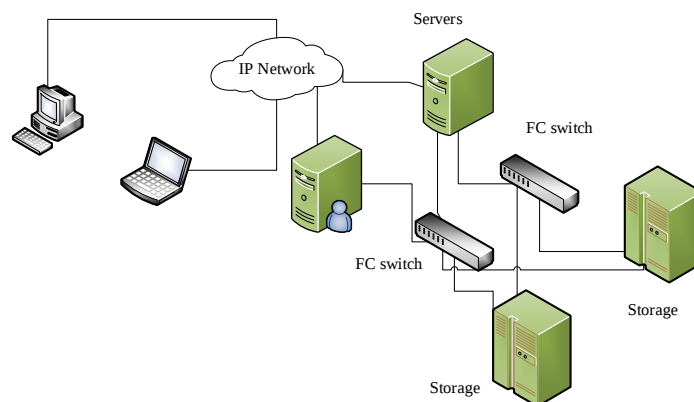


Рис.1 – Компоненты СХД блочного типа

Запрос ввода-вывода передается из вычислительной системы через внешний порт и обрабатывается с помощью кэш-памяти серверной части. Запрос чтения-записи может обслуживаться непосредственно из кэш-памяти, если в ней обнаружены необходимые пользователю данные. В современных системах хранения клиентский интерфейс, кэш-память и серверная часть обычно интегрированы в единую панель (которую называют процессором СХД или контроллером системы хранения данных).

Клиентский интерфейс обеспечивает обмен данными между системой хранения и вычислительной системой. Он состоит из двух компонентов: внешних портов и внешних контроллеров. Обычно клиентский интерфейс имеет резервные контроллеры для обеспечения высокой доступности, а каждый контроллер содержит несколько портов, которые позволяют подключать множество вычислительных систем к интеллектуальной системе хранения данных.

Операции записи с кэш-памятью обеспечивают преимущества в производительности посредством прямой записи в систему хранения (**Рис.2**). Когда операция записана в кэш-память и подтверждена, она выполняется быстрее (для вычислительной системы), чем это происходит в том случае, когда операция записывается прямо в систему хранения. Последовательная запись также предлагает возможности для оптимизации, поскольку несколько небольших операций записи можно объединить для передачи в систему хранения с помощью кэш-памяти. Для выполнения операций записи с использованием кэш-памяти используются следующие методы.

- Кэширование со сквозной записью. Данные помещаются в кэш-память и незамедлительно записываются в систему хранения, а в вычислительную систему отправляется подтверждение. Данные отправляются в систему хранения немедленно, поэтому риск их потери низкий. Однако время отклика операций записи увеличивается из-за операций, выполняемых системой хранения.
- Кэширование с обратной записью. Данные помещаются в кэш-память, а подтверждение отправляется в вычислительную систему мгновенно. Позже данные нескольких операций записи направляются (переносятся с удалением) в систему хранения. Отклик для операций записи происходит намного более оперативно, поскольку операции записи изолированы от устройств хранения данных. Однако переданные данные могут быть утрачены, если произойдет сбой кэш-памяти.

Кэш-память можно обойти при определенных условиях, например, если операции ввода-вывода выполняются с большими объемами данных. В этом случае, если объем запроса ввода-вывода превышает предустановленный размер (*размер обособленной операции записи*), то записанные данные напрямую отправляются в систему хранения, чтобы снизить нагрузку на кэш-память, вызванную использованием больших объемов данных. Это особенно полезно в средах, где ресурсы кэш-памяти ограничены, а сама кэш-память используется для произвольных операций чтения и записи малого объема.

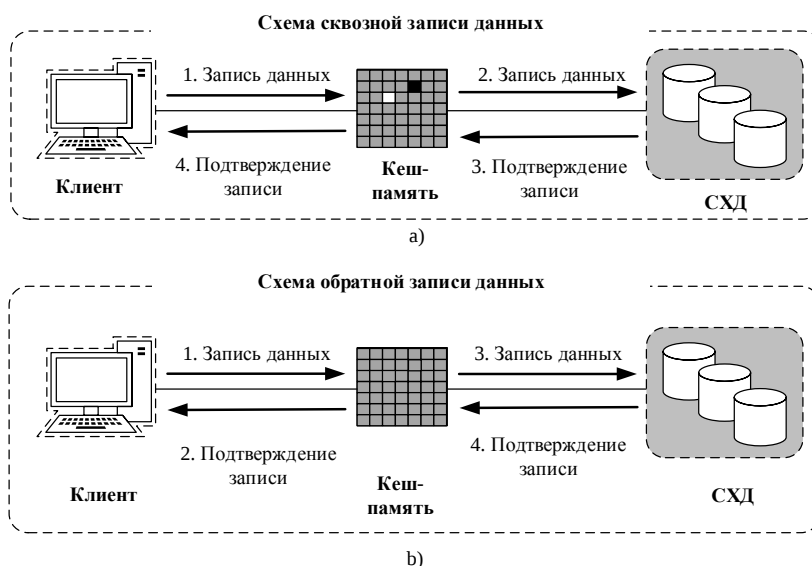


Рис.2 – Операции записи с использованием кэш-памяти

Серверная часть обеспечивает взаимодействие между кэш-памятью и физическими дисками СХД. Она состоит из двух компонентов: внутренних

портов и контроллеров серверной части. Серверная часть контролирует обмен данными между кэш-памятью и физическими дисками. Данные отправляются из кэш-памяти в серверную часть, а затем передаются на целевые диски СХД. Физические диски подключаются к портам серверной части. Внутренний контроллер обменивается данными с дисками СХД в процессе выполнения операций чтения и записи, а также предоставляет дополнительное (но ограниченное в объеме) временное хранилище для данных. Алгоритмы, выполняемые для контроллеров серверной части, обеспечивают поиск и исправление ошибок, а также функциональность массивов RAID.

Физические диски СХД подключены к контроллеру СХД серверной части и обеспечивают возможность хранения данных на постоянной основе. Современные интеллектуальные системы хранения поддерживают множество дисков СХД различных типов, работающих с разными скоростями, например, Fibre Channel, SATA, SAS и твердотельные диски (SSD).

Целью данной работы является определение функции распределения (ФР) времени отклика блочной системы облачного хранения данных на запрос записи данных с использованием метода траекторий [8].

Поставим задачу следующим образом: пусть известны ФР $F_1(t)$, $G_1(t)$ и $R_1(t)$ случайных величин (СВ) α_1 , γ_1 и β_1 , которые являются временами обработки запросов на запись от пользователя к кэш-памяти, от кэш-памяти к серверу хранения данных (СеХД) и само время записи в кэш-память соответственно, а также ФР $F_2(t)$, $G_2(t)$ и $R_2(t)$ случайных величин α_2 , γ_2 и β_2 – времен между сбоями в каналах связи между пользователем и модулями памяти, между кэш-памятью и СеХД и сбоями записи в кэш-память. Кроме этого известна вероятность p необходимости сохранения требуемой информации в модулях памяти СеХД.

При построении модели принимается допущение о том, что при возникновении сбоя в канале передачи данных выполнение пользовательского запроса на запись данных начинается сначала.

В проводимом исследовании необходимо определить функцию распределения времени полной обработки запроса на запись указанной системой.

Функционирование системы опишем полумарковским процессом (ПМП) $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний [9, 10, 11, 12, 13]. Введем следующее множество E полумарковских состояний системы:

$$E = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}.$$

Расшифруем содержательный смысл кодов состояний:

S_0 – запрос выполнен (мгновенное состояние);

S_1 – запрос от пользователя получен (или в момент выполнения запроса произошел сбой в канале передачи данных), началось повторное выполнение запроса;

S_2 – производится запись данных в модули кэш-памяти (или во время выполнения записи произошел сбой), запись началась с начала;

S_3 – данные необходимо сохранить в СеХД (или во время выполнения запроса к СеХД произошел сбой в канале передачи данных), выполнение запроса началось сначала.

Граф состояний системы представлен на **Рис.3**.

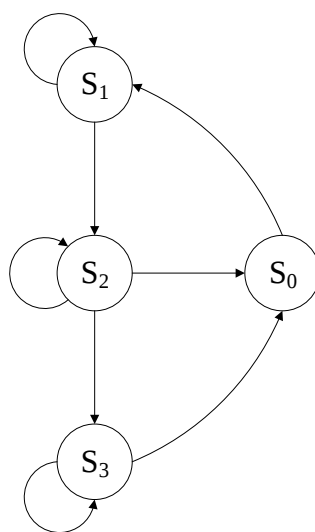


Рис.3 – граф системы

Времена пребывания $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ системы в состояниях S_0, S_1, S_2 и S_3 равны:

$$\theta_0 = 0; \theta_1 = (\alpha_1 \wedge \alpha_2); \theta_2 = (\beta_1 \wedge \beta_2); \theta_3 = (\gamma_1 \wedge \gamma_2),$$

где $\wedge$ – знак, обозначающий минимум случайных величин.

Тогда ФР времен пребывания системы в состояниях равны:

$$F_{S_0}(t) = 0;$$

$$\bar{F}_{S_1}(t) = \bar{F}_1(t) \cdot \bar{F}_2(t);$$

$$F_{S_2}(t) = \bar{R}_1(t) \cdot \bar{R}_2(t);$$

$$\bar{F}_{S_3}(t) = \bar{G}_1(t) \cdot \bar{G}_2(t).$$

Опишем вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0^1 = 1; \\ P_1^1 \{ \alpha_1 > \alpha_2 \} = \int_0^\infty \bar{F}_1(t) f_2(t) dt; \\ P_1^2 \{ \alpha_1 < \alpha_2 \} = \int_0^\infty f_1(t) \bar{F}_2(t) dt; \\ P_2^0 = p \int_0^\infty r_1(t) \bar{R}_2(t) dt; P_2^2 = \int_0^\infty \bar{R}_1(t) r_2(t) dt; \\ P_2^3 = (1-p) \int_0^\infty r_1(t) \bar{R}_2(t) dt; \\ P_3^0 = \int_0^\infty \bar{G}_1(t) g_2(t) dt; P_3^3 = \int_0^\infty g_1(t) \bar{G}_2(t) dt. \end{array} \right. \quad (1)$$

Используя систему (1), запишем систему уравнений для определения стационарного распределения вложенной цепи Маркова $\rho(x)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 = \rho_2 \cdot P_2^0 + \rho_3 \cdot P_3^0 \\ \rho_1 = \rho_0 \cdot P_0^1 + \rho_1 \cdot P_1^1 \\ \rho_2 = \rho_1 \cdot P_1^2 + \rho_2 \cdot P_2^2 \\ \rho_3 = \rho_2 \cdot P_2^3 + \rho_3 \cdot P_3^3 \end{array} \right. \quad (2)$$

Условие нормировки:

$$\rho_0 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 1. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2) с использованием условия (3), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 = \frac{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}; \\ \rho_1 = \frac{P_2^3 \cdot P_3^0}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}; \\ \rho_2 = \frac{P_1^2 \cdot P_3^0}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}; \\ \rho_3 = \frac{P_1^2 \cdot P_2^3}{P_1^2 \cdot P_2^3 \cdot P_3^0 + P_2^3 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_3^0 + P_1^2 \cdot P_2^3}. \end{array} \right.$$

Представим множество всех состояний в виде: $E = E_+ \cup E_-$, $E_+ = \{S_1, S_2, S_3\}$, $E_- = \{S_0\}$. Подмножество состояний E_+ описывает процесс обслуживания запроса на запись данных.

Воспользуемся методом траекторий [8] для определения ФР полного времени обработки запроса на чтение системой. Для этого воспользуемся

теоремой о ФР времен пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий [8].

Определим траектории выхода системы в подмножество E_- .

$$T_1 = \{S_1 S_2\},$$

$$T_2 = \{S_1 S_2 S_3\}.$$

Определим ФР времен пребывания системы в состояниях 21 и 20 системы с учетом повторных попаданий по формуле (1):

$$F_{S1}^{\theta}(s) = \frac{F_{S1}(s)}{c_1 - (c_1 - 1) f_{S1}(s)}; \quad F_{S2}^{\theta}(s) = \frac{F_{S2}(s)}{c_1 - (c_1 - 1) f_{S2}(s)};$$

$$F_{S3}^{\theta}(s) = \frac{F_{S3}(s)}{c_3 - (c_3 - 1) f_{S3}(s)},$$

где $c_1 = \frac{\rho_1}{\rho_0 \cdot P_0^1}; c_2 = \frac{\rho_2}{\rho_0 \cdot P_0^1}; c_3 = \frac{\rho_3}{\rho_0 \cdot P_0^1}.$

С помощью последовательной свертки определим ФР времени пребывания системы в каждой траектории:

$$F_1^T(t) = F_{S1}^{\theta}(t) * F_{S2}^{\theta}(t); \quad F_2^T(t) = F_{S1}^{\theta}(t) * F_{S2}^{\theta}(t) * F_{S3}^{\theta}(t),$$

где $*$ – знак операции свертки.

Найдем вероятности реализации каждой из траекторий:

$$P_1^T = p; \quad P_2^T = 1 - p.$$

Причем $P_1^T + P_2^T = 1.$

Отсюда становится возможным определить ФР $F_{\Sigma}^{\theta}(t)$ времени пребывания системы в подмножестве E_+ вне зависимости от начального состояния, как взвешенную сумма (смесь) ФР времен пребывания системы в подмножестве каждой траектории с коэффициентами равными вероятностям реализации этих траекторий

$$F_{\Sigma}^{\theta}(t) = F_1^T(t) \cdot P_1^T + F_2^T(t) \cdot P_2^T. \quad (4)$$

Результаты моделирования по формуле (4) представлены на **Рис.4**.

Исходными данными для моделирования служат, ФР $F_1(t)$, $F_2(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$, $R_1(t)$ и $R_2(t)$, которые соответствуют обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \mu_1, \mu_2; \nu_1, \nu_2; \tau_1, \tau_2, \sigma_1, \sigma_2$ соответственно. Причем:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \text{ где } \lambda_1 = 1,101 \text{ (с}^{-1}\text{); } \lambda_2 = 10,899 \text{ (с}^{-1}\text{);}$$

$$f_2(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1}, \text{ где } \mu_1 = 0,0688 \text{ (с}^{-1}\text{); } \mu_2 = 0,681 \text{ (с}^{-1}\text{);}$$

$$g_1(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1}, \text{ где } \nu_1 = 1,101 \text{ (с}^{-1}\text{)}; \nu_2 = 10,899 \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$g_2(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1}, \text{ где } \nu_1 = 0,0688 \text{ (с}^{-1}\text{)}; \nu_2 = 0,681 \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$r_1(t) = \frac{\tau_1 \tau_2 (e^{-\tau_1 t} - e^{-\tau_2 t})}{\tau_2 - \tau_1}, \text{ где } \tau_1 = 11,01 \text{ (с}^{-1}\text{)}; \tau_2 = 108,99 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

$$r_2(t) = \frac{\sigma_1 \sigma_2 (e^{-\sigma_1 t} - e^{-\sigma_2 t})}{\sigma_2 - \sigma_1}, \text{ где } \sigma_1 = 1,101 \text{ (с}^{-1}\text{)}; \sigma_2 = 10,899 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

А также вероятность нахождения данных в кэш-памяти системы $p = 0.4$.

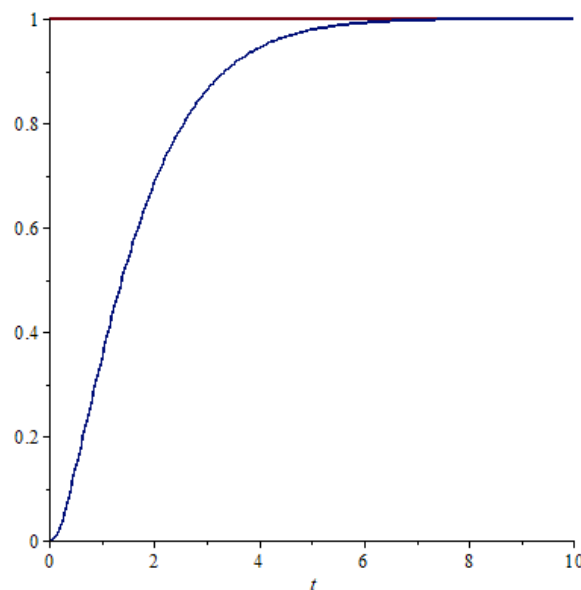


Рис.4 – Вид ФР полного времени обработки запроса на чтение

Сравним значения математического ожидания полученной нами функции (4) и математического ожидания, определяемого с помощью выражения [11]:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in M_+} m_i \rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_i} \quad (5)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет

$$1.6896477129 \text{ с.},$$

тогда как определяемое по формуле (5) –

$$1.6896477129 \text{ с.}$$

Проведенное сравнение значений математического ожидания времени полной обработки запроса на запись системой хранения данных, определенного с использованием полученной нами функции

распределения, и полученного по формуле, приведенной в работе [11], показало полное совпадение результатов.

Полученные результаты позволяют определять время ответа на запрос записи данных системы облачного хранения, что позволяет оценить влияние быстродействия информационной системы на адаптивность технологического процесса и, если необходимо, принять решение о повышении быстродействия системы. Полученная в результате моделирования функция распределения позволяет использовать данную модель при построении моделей более сложных иерархически подчиненных информационных и производственных систем.

Исследования выполнены при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 19-01-00704а.

Библиографический список

1. NIST Special Publication 500-307 Cloud Computing Service Metrics Description, NIST Cloud Computing Reference Architecture and Taxonomy Working Group. Web: http://www.nist.gov/itl/cloud_upload/RATAX-Cloud_Service_Metrics_Description-DRAFT-20141111.pdf
2. Скатков А.В. Расширение референтной модели облачной вычислительной среды в концепции крупномасштабных научных исследований / А.В. Скатков, В.И. Шевченко // Труды ИСП РАН. 2015. № 6. С.285-306. DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-18
3. Doelitzscher F. Sun Behind Clouds - On Automatic Cloud Security Audits and a Cloud Audit Policy Language / F. Doelitzscher and [etc] // International Journal on Advances in Networks and Services, vol 6 no 1&2, 2013.
4. Singha S. A Survey Paper on Cloud Storage Auditing with Key Exposure Resistance / S. Singha, S.D. Satav // International Journal of Science and Research (IJSR), Vol. 4 Issue 11, November 2015, pp. 1821-1823.
5. Wang B. Public Auditing for Shared Data with Efficient User Revocation in the Cloud [сайт]. URL: <http://iqua.ece.toronto.edu/papers/bwang-infocom13.pdf>.
6. Hogan M. NIST Cloud Computing Standards Roadmap / M. Hogan and [etc] // Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8930 July 2011, URL: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=909024.
7. От хранения данных к управлению информацией. 2-е изд. – СПб: Питер, 2016. – 544 с.
8. Заморёнов М.В. Апробация метода траекторий на примере моделирования процесса функционирования производственного элемента с обесценивающими отказами / Заморёнов М.В. и [др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2015, С. 57-71.

9. Королук В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления / В.С. Королук. – Кибернетика. – 1981. №4. – С. 121 – 124.
10. Королук В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1976. – 181 с.
11. Королук В.С. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – К.: Наук. Думка, 1982. – 236 с.
12. Королук В.С. Стохастические модели систем / В.С. Королук. – Киев: Наукова думка, 1989. – 208 с.
13. Королук В.С. Фазовое укрупнение сложных систем / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – Киев: издательское объединение «Вища школа», 1978. – 112 с.

Bibliograficheskij spisok

1. NIST Special Publication 500-307 Cloud Computing Service Metrics Description, NIST Cloud Computing Reference Architecture and Taxonomy Working Group. Web: [http://www.nist.gov/itl/cloud /upload/RATAX-Cloud Service Metrics Description-DRAFT-20141111.pdf](http://www.nist.gov/itl/cloud/upload/RATAX-Cloud%20Service%20Metrics%20Description-DRAFT-20141111.pdf)
2. Skatkov A.V. Rasshirenije referentnoj modeli oblachnoj vychislitel'noj sredy v koncepcii krupnomasshtabnyh nauchnyh issledovanij / A.V. Skatkov, V.I. Shevchenko // Trudy ISP RAN. 2015. № 6. S.285-306. DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-18
3. Doelitzscher F. Sun Behind Clouds - On Automatic Cloud Security Audits and a Cloud Audit Policy Language / F. Doelitzscher and [etc] // International Journal on Advances in Networks and Services, vol 6 no 1&2, 2013.
4. Singha S. A Survey Paper on Cloud Storage Auditing with Key Exposure Resistance / S. Singha, S.D. Satav // International Journal of Science and Research (IJSR), Vol. 4 Issue 11, November 2015, pp. 1821-1823.
5. Wang B. Public Auditing for Shared Data with Efficient User Revocation in the Cloud [sajt]. URL: <http://iqua.ece.toronto.edu/papers/bwang-infocom13.pdf>.
6. Hogan M. NIST Cloud Computing Standards Roadmap / M. Hogan and [etc] // Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8930 July 2011, URL: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=909024.
7. Ot hraneniya dannyh k upravleniyu informaciej. 2-e izd. SPb: Piter, 2016. – 544 s.
8. Zamoryonov M.V. Aprobaciya metoda traektorij na primere modelirovaniya processa funkcionirovaniya proizvodstvennogo elementa s obescenivayushchimi otkazami / Zamoryonov M.V. i [dr.] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 8: v 2 ch. CH. 1 Tula: Izd-vo TulGU, 2015, S. 57-71.
9. Korolyuk V.S. Superpoziciya processov markovskogo vosstanovleniya /

- V.S. Korolyuk. – Kibernetika. – 1981. №4. – S. 121 – 124.
10. Korolyuk V.S. Polumarkovskie processy i ih prilozheniya / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1976. – 181 s.
11. Korolyuk V.S. Processy markovskogo vosstanovleniya v zadachah nadezhnosti sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – K.: Nauk. Dumka, 1982. – 236 s.
12. Korolyuk V.S. Stohasticheskie modeli sistem / V.S. Korolyuk. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 208 s.
13. Korolyuk V.S. Fazovoe ukрупnenie slozhnyh sistem / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – Kiev: izdatel'skoe ob"edinenie «Vishcha shkola», 1978. – 112 s.

¹Заморёнов Михаил Вадимович — к.т.н., доцент кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы», СевГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, стохастические модели систем, схемотехника. Число научных публикация — 65. zamoryonoff@gmail.com; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)742-00-03.

²Копп Вадим Яковлевич — д.т.н., профессор кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», СевГУ. Область научных интересов: математическое моделирование, стохастические модели систем, автоматизация технологических процессов, многократные измерения. Число научных публикаций — 104. v_kopp@mail.ru; ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ; м.т. +7(978)742-00-07.

³Заморёнова Дарья Викторовна, канд. техн. наук, доц., zamik@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

⁴Владимирова Елена Сергеевна — старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и компьютерные системы», СевГУ. ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, РФ.

MODELING THE PROCESS OF FUNCTIONING A DATA STORAGE CLOUD SYSTEM BY THE TRAJECTORY METHOD

M.V. Zamoryonov, V.Y. Kopp, D.V. Zamoryonova, E.S. Vladimirova

The process of functioning of a cloud storage system is considered. Using the trajectory method, a semi-Markov model for processing a request for data recording by such a system is constructed. The distribution functions of the residence times of the system in states taking into account repeated hits are found. The distribution function, the mathematical expectation and the variance of a random variable — the time it takes to completely process a request for recording data — are determined. The simulation results are compared with the results

obtained by the theorem on the average stationary time of a system's stay in a subset of states.

Keywords: cloud storage systems, semi-Markov model, trajectory method, distribution function.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich - Ph.D., Associate Professor, Department of Information Technology and Computer Systems, SevSU. Research interests: mathematical modeling, stochastic models of systems, circuitry. The number of publications is 65. zamoryonoff@gmail.com; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 742-00-03.

Kopp Vadim Yakovlevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Instrument Systems and Automation of Technological Processes, SevSU. Research interests: mathematical modeling, stochastic models of systems, automation of technological processes, multiple measurements. The number of publications - 104. v_kopp@mail.ru; st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; phone +7 (978) 742-00-07.

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, zamik@ukr.net, Russia, Tula, Sevastopol State University.

Vladimirova Elena Sergeevna - Senior Lecturer, Department of Information Technology and Computer Systems, SevSU. st. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation.

АЛГОРИТМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯМИ АНТРОПОМОРФНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Крамарь В.А.¹, Путин А.Н.², Токарев Д.А.³, Кабанов А.А.⁴

Аннотация. В статье рассматриваются соотношения для реализации алгоритмов технического зрения. Проанализирован классический подход к решению задачи компьютерного зрения. Рассмотрен подход к решению задачи восстановления неизвестного вращения и смещения на откалиброванном изображении. Приведено решение задачи триангуляции, использованной при построении алгоритмов системы технического зрения. Описано решение задачи калибровки стереокамеры. Приведено описание предлагаемых алгоритмов технического зрения для решения задач планирования траектории движения захватного модуля при согласованном управлении движениями антропоморфных манипуляторов.

Ключевые слова. Техническое зрение, планирование траектории, калибровка стереокамеры, согласованное движение, антропоморфный манипулятор.

В последнее время системы технического зрения становятся одним из основных инструментов для управления манипуляторами роботов [1]. Получаемое от системы изображение обрабатывается для получения функций, которые будут использоваться для уменьшения ошибки между текущей и желаемой целью. Это обусловлено тем, что видеокамеры обеспечивают самую высокую пропускную способность данных среди всех существующих датчиков [2].

Задача достижения манипулятором заданной точки решается при помощи обратной задачи кинематики [1,3], в которой достижение заданной точки осуществляется приданием определенных значений углов поворота двигателям звеньев манипулятора.

Методология и математический подход каждого алгоритма отслеживания объектов при помощи системы технического зрения очень разнообразны [4,5]. Обычно используемый алгоритм зависит от выполняемой задачи.

В настоящей статье рассматриваются геометрические основы для реализации трехмерного зрения и подходы для схватывания захватом объекта на основе данных, полученных от системы 3D зрения.

Классический подход к решению задачи компьютерного зрения. Основой в реализации алгоритмов 3D зрения является представление проекции пространства на плоскость изображения. Предположим, что точка в пространстве (X, Y, Z) имеет координаты (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) относительно

системы координат камеры ci . При этом, эти координаты связаны друг с другом следующим преобразованием

$$\begin{pmatrix} X_{ci} & Y_{ci} & Z_{ci} \end{pmatrix}^T = R_i \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix}^T + T_i$$

где R_i – матрица вращения, столбцы которой – оси пространственной системы координат относительно камеры. Вектор смещения T_i начинается с начала отсчета камеры и заканчивается в начале пространственной системы координат.

Предполагается, что центр проекции является источником системы координат, а оптическая ось является осью Z_{ci} камеры. Если предположить, что плоскостью изображения является плоскость $Z_{ci} = 1$, то координаты изображения (x_i, y_i) определяются по формулам $x_i = X_{ci} / Z_{ci}$, $y_i = Y_{ci} / Z_{ci}$.

На практике обычно измеряют координаты пикселей (u_i, v_i) , которые связаны с координатами (x_i, y_i) преобразованием

$$u_i = f\alpha x_i + \beta y_i + c_u, \quad v_i = fy_i + c_v,$$

где f – расстояние от плоскости изображения до центра проекции, измеренное в пикселях, α – соотношение сторон, β – коэффициент перекоса, c_u, c_v – определяют центр изображения.

Указанные пять параметров называются внутренними параметрами, а процесс их восстановления называется внутренней калибровкой. После восстановления внутренних параметров можно говорить о калиброванной системе и работать с координатами изображения (x_i, y_i) вместо координат пикселей (u_i, v_i) . Во многих системах зрения широкоугольные объективы вносят радиальное искажение вокруг центра изображения, которое можно моделировать полиномиально

$$x_i^{dist} = x_i(1 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots), \quad y_i^{dist} = y_i(1 + k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots)$$

где $r^2 = x_i^2 + y_i^2$.

Проблема оценки положения. Задача восстановления неизвестного вращения и смещения на откалиброванном изображении называется оценкой положения. Это предполагает идентификацию точек на изображении. В робототехнике оценка положения является вариантом решения задачи локализации объекта в известной обстановке. При захвате объектов известной формы данный метод дает целевое положение для конечной позиции модуля захвата. Предположим, что камера откалибрована. Возьмем N точек в мировых координатах $X_j = 1 \dots N$ и $x_j = 1 \dots N$ на калиброванном изображении. Выберем две точки сцены и обозначим известный угол между их проекциями x_1 и x_2 как δ_{12} .

Обозначим квадрат расстояния $\|X_i - X_j\|^2 = d_{ij}^2$, $X_j = d_j^2$, тогда по правилу косинусов:

$$d_i^2 + d_j^2 - 2d_i d_j \cos \delta_{ij} = d_{ij}^2 \quad (1)$$

Если можно восстановить d_i и d_{ij} , то остальное будет лишь задачей абсолютного позиционирования

$$d_j x_j = R X_j + T \quad (2)$$

для того, чтобы восстановить смещение и вращение между камерой и мировой системой координат.

Правило косинуса имеет два неизвестных d_1 и d_2 , поэтому имея три точки, можно решить проблему оценки положения. Действительно, три точки дают систему из трёх квадратных уравнений с тремя неизвестными, так что она будет иметь максимум восемь решений.

Зададим $d_2 = u d_1$ и $d_3 = v d_1$ и решим все три уравнения относительно

$$d_1: \quad d_1^2 = \frac{d_{23}^2}{u^2 + v^2 - 2uv \cos \delta_{23}}, \quad d_1^2 = \frac{d_{23}^2}{1 + v^2 - 2v \cos \delta_{13}}, \quad d_1^2 = \frac{d_{12}^2}{u^2 + 1 - 2u \cos \delta_{12}}, \quad \text{что}$$

эквивалентно двум квадратным уравнениям:

$$d_{12}^2(1 + v^2 - 2v \cos \delta_{13}) = d_{13}^2(u^2 + 1 - 2u \cos \delta_{12}), \quad (3)$$

$$d_{13}^2(u^2 + v^2 - 2uv \cos \delta_{23}) = d_{23}^2(1 + v^2 - 2v \cos \delta_{13}), \quad (4)$$

Решаем (4) для u^2 и подставляем это решение в (3), что позволит решить относительно u . Для каждого v получаем два корня u через любое из квадратных уравнений, получая максимум восемь решений. Другой метод для n мировых точек выражает трехмерные точки как барицентрические координаты учитывая четыре виртуальные контрольные точки

$$X_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij} C_j,$$

где $\sum_{j=1}^4 a_{ij} = 1$.

Преобразование в системе координат камеры оставляет барицентрические координаты инвариантными и дает проекцию перспективы

$$\lambda_i x_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij} (X_{cj}, Y_{cj}, Z_{cj})^T.$$

Сокращая λ_i , получаем два линейных уравнения для каждой точки

$$\sum_{j=1}^4 a_{ij} C_{x_{cj}} = a_{ij} x_i C_{z_{cj}}, \quad \sum_{j=1}^4 a_{ij} C_{y_{cj}} = a_{ij} y_i C_{z_{cj}}.$$

С учетом координат контрольных точек в кадре камеры имеем 12 неизвестных. Неизвестные контрольные точки найдены с точностью до масштабного коэффициента, который легко определить, потому что известны расстояния между точками. Положение найдено из абсолютной ориентации между контрольными точками в камере и кадром мировой системы координат. Это дает эффективное решение для $n \geq 6$ точек, но

оставляет с первоначальным выбором контрольных точек как фактором, влияющим на решение.

Задача триангуляции. Часто, в задаче технического зрения используется две камеры. При этом, классический подход решения задачи триангуляции с использованием двух параллельных, жестко закрепленных камер заключается в решении следующей системы уравнений

$$Z = f \frac{T}{x_2 - x_1}; X = x_2 \frac{Z}{f}; Y = y_2 \frac{Z}{f},$$

где f – фокусное расстояние камер, T – стереобазы (Рис.1).

При вращении камеры вдоль оси X определяются координаты по формулам $Z = f \frac{T}{x_2 - x_1}; X = x_2 \frac{Z}{f}; Y = y_2 \frac{Z}{f} + \tan \varphi$.

При вращении камеры вдоль оси Y определяются координаты по формулам $Z_0 = \frac{T}{\tan \theta}, Z = f \frac{T}{x_2 - x_1 + f * T / Z_0}, X = x_2 \frac{Z}{f}, Y = y_2 \frac{Z}{f}$.

При вращении камеры вдоль оси Z изображение просто поворачивается вокруг принципиальной точки. В общем виде выражение поворота имеет вид

$$p' = R^T (p - T),$$

где T – вектор смещения правой камеры относительно левой; R^T – матрица поворота правой камеры относительно левой; p и p' – координаты проекции искомой точки в пространстве на двумерных изображениях.

Как и в случае с одной камерой, с двумя камерами калибровка позволяет получить параметры стереокамеры, такие как: фокусное расстояние, принципиальная точка, угол наклона пикселя, стереобазы, линейные смещения, углы наклона. Так же определяются коэффициенты дисторсии, которые хоть и не вписываются в линейную модель, но также необходимы для точных расчетов.

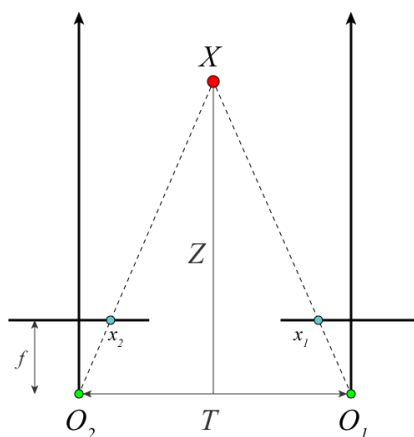


Рис.1 – Иллюстрация триангуляции точки

Таким образом при помощи калибровки мы можем получить необходимые для триангуляции параметры.

Калибровка стереокамеры. Калибровкой камеры (Рис.2) называют задачу нахождения внешних и внутренних параметров камеры по изображениям, отснятым этой камерой. Так же калибровка позволяет получить коэффициенты дисторсии, при помощи которых в дальнейшем можно устранить оптические искажения.

Математически калибровку можно представить, как решение системы линейных уравнений в матричной форме

$$P_{img} = A[RT]P_w,$$

где P_{img} – координаты точки в двумерном пространстве изображения, P_w – координаты точки в трехмерном пространстве (мировые координаты), A – матрица внутренних параметров калибровки, R – матрица поворотов камеры, T – вектор смещения камеры.

Матрица внутренних параметров в свою очередь имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} a_x & \gamma & c_u \\ 0 & a_y & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\gamma = a_x a_y \tan \varphi$ – коэффициент угла наклона пикселя, φ – угол наклона пикселя, $a_x a_y$ – фокусное расстояние по ширине и высоте пикселя, $c_u c_v$ – принципиальная точка.

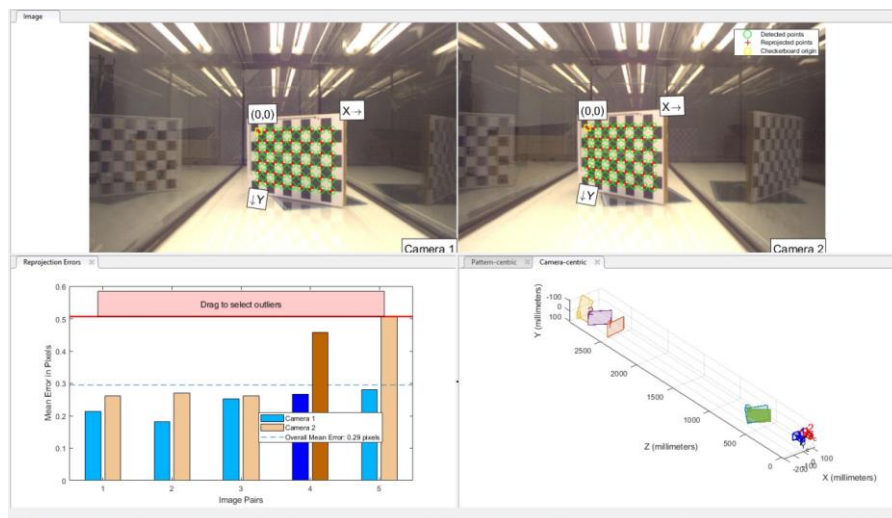


Рис.2 – Калибровка стереокамеры в среде MATLAB

Алгоритм анализа столкновения с препятствиями. Столкновение с препятствиями при согласованной работе манипуляторов на основе данных, полученных от системы технического зрения, требует специального алгоритма для анализа [6,7]. При работе с антропоморфными манипуляторами в заранее не известном окружении необходимо детектировать все окружающие объекты, дать им оценку и классифицировать их как препятствия, либо просто не учитывать их, если они препятствиями не являются. Описанные ранее принципы и алгоритмы являются неотъемлемой частью системы планирования траектории

антропоморфных манипуляторов. Данные алгоритмы позволяют с высокой точностью оценить не только положение объектов в пространстве, но и их габариты, что в свою очередь дает возможность построения траектории, движения манипулятора, огибающей детектированные препятствия. Например, аппроксимируя препятствие сферой мы получаем от системы технического зрения центр сферы и ее радиус.

Обладая информацией для построения траекторий всех звеньев манипулятора с обходом препятствия можем использовать метод планирования траектории на основе линейно-кусочной аппроксимации траектории. Получив от системы технического зрения точку в пространстве, куда необходимо переместить захватный модуль многозвенного манипулятора, на основании полученной информации можем проверить наличие столкновения манипулятора с препятствием при движении по заданной траектории. Возможность столкновения проверяем для всех сочленений манипулятора и для всех препятствий. Если планируемая траектория не проходит ни через одно из препятствий, то манипулятор продолжает выполнение задачи без коррекций. Если на каком-то участке траектории происходит столкновение, тогда запускается алгоритм обхода препятствия. Для реализации указанного алгоритма вводится дополнительная точка в пространстве путем смещения ближайшей точки траектории от центра сферы. После, алгоритм повторяется для полученных отрезков траектории до тех пор, пока все полученные отрезки будут проходить в обход препятствия. Возможный вид новой траектории при обходе препятствия приведен на **Рис.3**.

Проверка состоит в том, что если расстояние от ближайшей к центру сферы точки траектории до центра сферы, моделирующей препятствие, меньше ее радиуса, значит, точка попала внутрь сферы и траектория пересекает препятствие.

Аналогичный алгоритм справедлив и для анализа самостолкновения многозвенных манипуляторов при их совместной работе. При этом, в качестве препятствия может использоваться цилиндр, моделирующий сочленение манипулятора. Подход к анализу самостолкновения манипуляторов заключается в проверке расстояния между осями цилиндров (**Рис.4**). Если расстояние между центральными осями, которые можно представить как скрещивающиеся векторы, больше чем сумма радиусов анализируемых цилиндров, то самостолкновения не происходит. Расстояние определяется длиной общего перпендикуляра, проведенного к этим векторам.

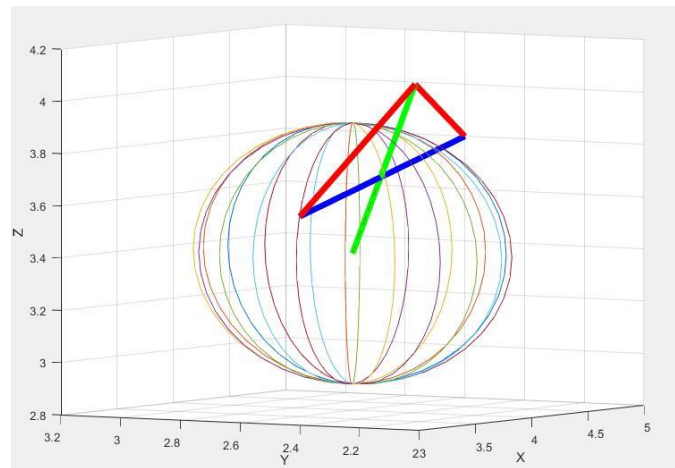


Рис.3 – Возможный вид новой траектории при обходе препятствия

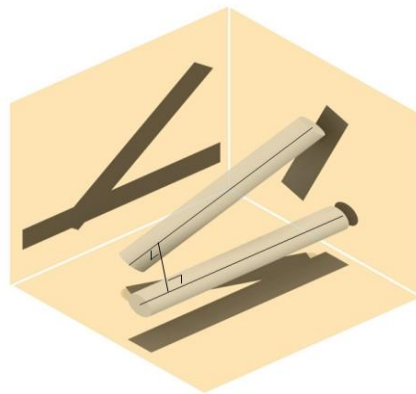


Рис.4 – Иллюстрация анализа самостолкновений сочленений манипулятора

Выводы. Выполнен анализ классического подхода к решению задачи компьютерного зрения. Приведено решение задачи триангуляции, использованной при построении алгоритмов системы технического зрения. Описано решение задачи калибровки стереокамеры, Приведено описание предлагаемых алгоритмов и методов технического зрения для решения задач планирования траекторий движения захватного модуля при согласованном управлении движениями антропоморфных манипуляторов. Выполненные исследования могут быть применены при построении методов управления антропоморфных манипуляторов в согласованном режиме работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта 18-48-920022 p_a

Библиографический список

1. Siciliano B. Robot learning, Handbook of robotics //B. Siciliano and [eds.] .– Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016. – p 2227.
2. Техническое зрение в системах управления мобильными объектами

- 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р.Р. Назирова. – М. : КДУ, 2011.– 328 с.
3. Peter C. Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in Matlab / C. Peter – Springer International Publishing AG 2017. – 697p.
4. Миронов С.В. Система технического зрения в задачах навигации мобильных объектов / С.В. Миронов, А.В. Юдин // Программные продукты и системы. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-tehnicheskogo-zreniya-v-zadachah-navigatsii-mobilnyh-obektov> (дата обращения: 01.04.2020).
5. Костылев Д.А. Машинное зрение в робототехнических системах / Д.А. Костылев, О.В. Федотов // Наука, техника и образование. 2016. №7 (25). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-zrenie-v-robototekhnicheskikh-sistemah> (дата обращения: 01.04.2020).
6. Kabanov A.A. Collision detection and avoidance method for two cooperative robot manipulators / A.A. Kabanov, D.A. Tokarev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044021 IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/709/4/044021
7. Kabanov A.A. Self-collision Avoidance Method for a Dual-arm Robot / A.A. Kabanov, D.A. Tokarev // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS).

Bibliograficheskiy spisok

1. Siciliano B. Robot learning, Handbook of robotics //B. Siciliano and [eds.] .– Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016. – p 2227.
2. Tekhnicheskoe zrenie v sistemah upravleniya mobil'nyimi ob"ektami 2010: Trudy nauchno-tekhnicheskoy konferencii-seminara. Vyp. 4 / Pod red. R.R. Nazirova. – М. : КДУ, 2011.– 328 с.
3. Peter C. Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in Matlab / C. Peter – Springer International Publishing AG 2017. – 697p.
4. Mironov S.V. Sistema tekhnicheskogo zreniya v zadachah navigacii mobil'nyh ob"ektov / S.V. Mironov, A.V. YUdin // Programmnye produkty i sistemy. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-tehnicheskogo-zreniya-v-zadachah-navigatsii-mobilnyh-obektov> (data obrashcheniya: 01.04.2020).
5. Kostylev D.A. Mashinnoe zrenie v robototekhnicheskikh sistemah / D.A. Kostylev, O.V. Fedotov // Nauka, tekhnika i obrazovanie. 2016. №7 (25). URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/mashinnoe-zrenie-v-robototekhnicheskikh-sistemah> (data obrashcheniya: 01.04.2020).
6. Kabanov A.A. Collision detection and avoidance method for two cooperative robot manipulators / A.A. Kabanov, D.A. Tokarev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 044021 IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/709/4/044021
7. Kabanov A.A. Self-collision Avoidance Method for a Dual-arm Robot /

A.A. Kabanov, D.A. Tokarev // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS).

¹*Крамарь Вадим Александрович, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры ИУТС, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

²*Путин Александр Николаевич, инженер НОЦ «Мехатроника и робототехника» alexputin.dev@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

³*Токарев Денис Александрович, канд. техн. наук, доц., Ведущий научный сотрудник НОЦ «Мехатроника и робототехника» tdanis@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

⁴*Кабанов Алексей Александрович, канд. техн. наук, доц., директор НОЦ «Мехатроника и робототехника» kabanovaleksey@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

TECHNICAL VISION ALGORITHMS FOR SOLVING THE PROBLEMS OF TRAJECTORY PLANNING OF THE END EFFECTOR MOVEMENT FOR THE COOPERATIVE CONTROL OF ANTHROPOMORPHIC MANIPULATORS

V.A. Kramar, A.N. Putin, D.A. Tokarev, A.A. Kabanov

The article considers the problems of development of algorithms for technical vision. The classical approach to solving the problem of computer vision is analyzed. An approach to solving the problem of recovering unknown rotation and displacement in a calibrated image (Perspective-n-Point problems) is considered. The solution of the triangulation problem used in the construction of the algorithms of the vision system is given. The solution to the problem of calibrating a stereo camera is described. A description of the proposed algorithms and methods of technical vision for solving the problems of planning the trajectories of the gripping module with the coordinated control of the movements of anthropomorphic manipulators is given.

Key words: technical vision, trajectory planning, stereo camera calibration, coordinated movement.

Vadim Alexander Kramar, Doctor of Engineering sciences, professor of the IUTS department, kramarv@mail.ru, Russia, Sevastopol, Federal State

Autonomous Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University”,

Alexander Putin, Engineer, REC “Mechatronics and Robotics” alexputin.dev@gmail.com, Russia, Sevastopol, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University”,

Denis Alexander Tokarev, Ph.D. tech. Sci., Assoc., Leading Researcher, REC “Mechatronics and Robotics” tdanis@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University”

Kabanov Aleksey Alexandrovich, Ph.D. tech. Sci., the Head of REC “Mechatronics and Robotics” tdanis@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Sevastopol State University”

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ АНТРОПОМОРФНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Крамарь В.А.¹, Крамарь О.А.², Путин А.Н.³

Аннотация. Активное внедрение антропоморфных манипуляторов требует разработки новых подходов и адаптации существующих подходов к построению их управления. Одним из важнейших подходов является решение прямой задачи кинематики требующей построения кинематической схемы манипулятора и описание его с помощью подхода Денавита-Хартенберга. В статье приводится систематическое представление указанных вопросов.

Ключевые слова. Антропоморфный манипулятор, прямая задача кинематики

Введение. Выполнение сложных операций манипуляторами робототехнических систем в различных средах требуют внедрения манипуляторов с большим количеством степеней свободы. Все большее распространение в робототехнических комплексах получают антропоморфные манипуляторы. Это связано с тем, что при взаимодействии робота и человека желательно, чтобы манипуляторы двигались согласно движению руки человека. Подобным роботом является антропоморфный робот SAR-400 (Рис.1) с двумя многосвязными манипуляторами с кинематической избыточностью [1].



Рис.1 – Робот SAR-400

Один из подходов решения задачи построения управления многосвязным (антропоморфным) манипулятором с кинематической избыточностью основан на применении метода преобразования координат Денавита–Хартенберга [2, 3], позволяющего решить прямую задачу кинематики определения координат положения в пространстве манипулятора и захвата.

Также, решение прямой задачи кинематики необходимо в ряде случаев применения альтернативного подхода к построению управления, основанного на подходе «Programming by Demonstration» [4]. Целью настоящей статьи является построение кинематической схемы манипулятора и решение на ее основе прямой задачи кинематики.

Построение кинематической схемы разрабатываемого многозвенного манипулятора. Рассмотрим прямую задачу кинематики, которую с учетом выбранной стратегии управления многозвенными манипуляторами робототехнического комплекса необходимо решить.

Отметим, что прямая задача кинематики заключается в расчете координат положения рабочего органа, при заданном наборе обобщенных координат всех звеньев манипулятора [5].

Первым шагом решения задачи является составление кинематической схемы разрабатываемого многозвенного манипулятора, которая представляет собой графическое изображение последовательности звеньев манипулятора, соединенных между собой сочленениями.

Несмотря на наличие вариантов элементарных сочленений с одной степенью свободы в рассматриваемом многозвенном манипуляторе используется только вращательные сочленения.

Кинематическая схема разрабатываемого манипулятора с шестью степенями свободы и рабочим органом приведена на **Рис.2**.

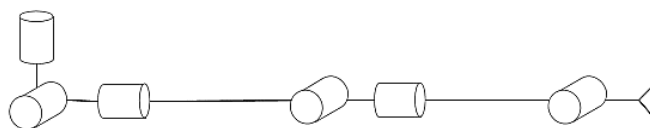


Рис.2 – Кинематическая схема манипулятора

С учетом наличия в манипуляторе, как указывалось выше, сочленений с вращательным движением будем использовать подход Денавита-Хартенберга, основанный на матричном методе последовательного построения систем координат, связанных с каждым звеном кинематической цепи [2, 3].

Смысл представления Денавита-Хартенберга состоит в составлении однородной матрицы преобразования, которая имеет размерность 4×4 и для каждого звена описывает положение системы координат относительно координатной системы предыдущего звена. Такой метод дает возможность последовательно преобразовать координаты базовой системы (начальное положение манипулятора) в координату, связанную с последним звеном.

Для решения задачи построим системы координат для звеньев манипулятора.

Пусть разрабатываемый многозвенный манипулятор, как указывалось выше имеет шесть степеней свободы. Каждое сочленение манипулятора

соединяет два звена: предыдущее и текущее ($i - 1$ и i). Пронумеруем шесть сочленений и один рабочий орган от нуля до шести, где нуль соответствует первому сочленению, а шесть – рабочему органу.

Алгоритм присвоения систем координат, не подразумевает одного единственного способа решения, однако итоговый результат должен быть всегда одинаковый ввиду однозначности решения прямой задачи кинематики.

Выберем оси Z_i строящейся системы координат. Будем выбирать ось Z_i так, чтобы она совпала с осью вращения последующего сочленения $i + 1$ (Рис.3).

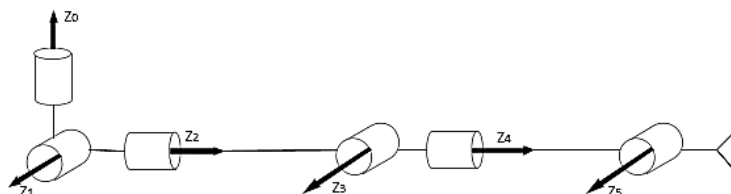


Рис.3 – Оси Z_i систем координат сочленений манипулятора

Ось X_i направляют так, чтобы она была перпендикулярна обеим осям Z_{i-1} и Z_i и направлена от Z_{i-1} к Z_i .

Ось X_0 для первого звена можно выбрать произвольно, однако лучше направить X_0 в ту же сторону, как и X_1 , так как именно они будут задавать значения обобщенных координат (вдоль осей Z_i), которые в начальной конфигурации предполагаются нулевыми. Иначе необходимо будет использовать базовые матрицы вращения, чтобы вернуть манипулятор в исходное положение.

Пересечение осей Z_i и X_i определяет точку отсчета систем координат. В случае если Z_{i-1} и Z_i параллельны, тогда X_i имеет несколько вариантов построения. В этом случае и начало координат принадлежащей оси может располагаться в любой точке.

Ось Y_i направляется так, чтобы система координат была правой (Рис.4).

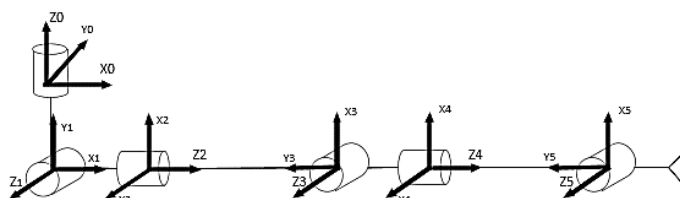


Рис.4 – Расположение осей Z_i , X_i , Y_i систем координат сочленений манипулятора

Последним шагом построения обобщенных координат, является выбор систем координат рабочего органа манипулятора. Принимая, что последнее сочленение является вращательным, получаем, что оси Z_{n-1} и Z_n совпадают. В этом случае необходимая система координат получается путем смещения предыдущей системы на фиксированное значение A_6 вдоль оси X_i . На **Рис.5** показан выбор шестой системы координат рассматриваемого шестизвеного манипулятора.

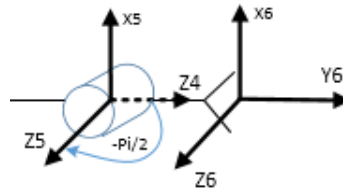


Рис.5 – Система координат Z_6, X_6, Y_6

Определение параметров Денавита-Хартенберга. Для шестизвеного манипулятора рассмотрим две системы координат: начальную, принадлежащую первому сочленению, X_0, Y_0, Z_0 и конечную, принадлежащую рабочему органу X_n, Y_n, Z_n . Расположение этих двух систем координат друг относительно друга определяется тремя угловыми и тремя линейными координатами.

Используя метод Денавита-Хартенберга мы сможем уменьшить количество координат, определяющих тело в пространстве, с шести до четырех. Четыре параметра Денавита-Хартенберга полностью описывают любое поступательное или вращательное движение и определяются следующим образом.

Относительное положение текущего и предыдущего звена (соседних звеньев) определяется двумя параметрами:

- 1 расстоянием d_i между смежными звеньями, отсчитываемым вдоль оси сочленения предыдущего звена;
- 2 углом θ_i между нормальными, измеряемым в плоскости, перпендикулярной оси предыдущего звена.

С точки зрения кинематики основное свойство звеньев состоит в том, что они сохраняют неизменной конфигурацию относительного расположения соседних звеньев, характеризуемую параметрами [3,6]:

- 3 A_i – кратчайшее расстояние смежных звеньев между осями Z_{i-1} и Z_i , измеряемое вдоль их общей нормали;
- 4 α_i – угол между осями сочленений, измеряемый в плоскости, перпендикулярной их общей нормали.

A_i и α_i . можно рассматривать соответственно, как длину и угол скрутки i -го звена. Эти параметры характеризуют конструктивные особенности i -го звена.

Таким образом, имеем, что A_i – расстояние вдоль оси X_i от Z_{i-1} до Z_i , α_i – угол вокруг оси X_i от Z_{i-1} до Z_i , d_i – расстояние вдоль оси Z_{i-1} от X_{i-1} до X_i , θ_i угол вокруг оси Z_{i-1} от X_{i-1} до X_i .

Для всех кинематических схем, параметры A_i и α_i являются константами и характеризуют конструктивные особенности звеньев манипулятора. Среди параметров d_i и θ_i , только один является константой, а другой изменяется в зависимости от типа сочленения. В случае вращательного сочленения угол θ_i является переменным, а смещение d_i постоянное.

На **Рис.6** приведены углы α_i для разрабатываемого многозвенного манипулятора.

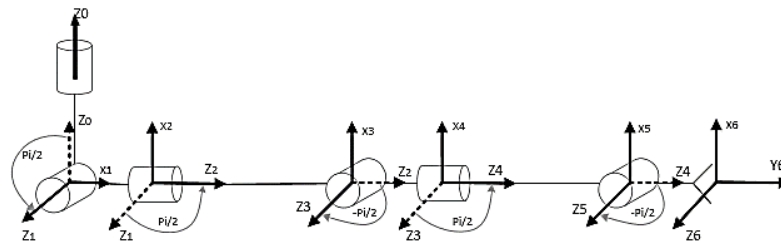


Рис.6 – Углы α_i разрабатываемого многозвенного манипулятора

На **Рис.7** приведены параметры смещений d_i для разрабатываемого многозвенного манипулятора.

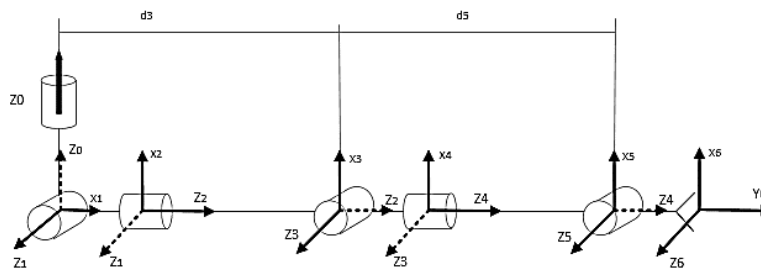


Рис.7 – Смещения d_i разрабатываемого многозвенного манипулятора

Таким образом, определим параметры Денавита-Хартенберга для «транспортного» положения манипулятора (**таблица 1**)

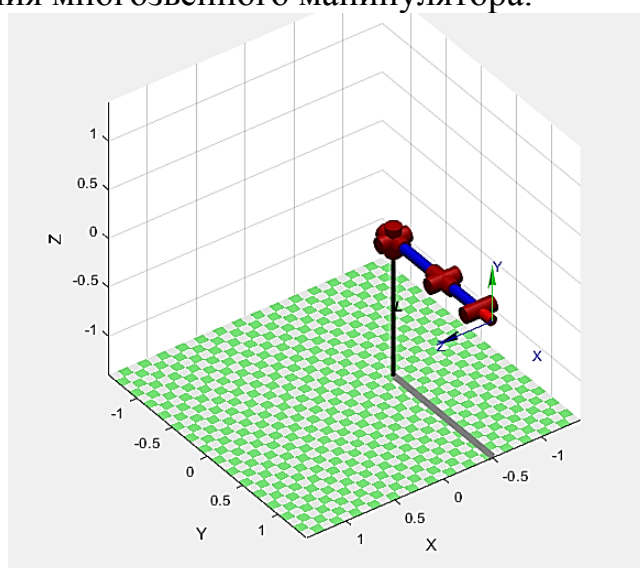
Таблица 1. – Параметры Денавита-Хартенберга для «транспортного» положения манипулятора

Звено, i	A_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
2	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
3	0	$-\pi/2$	0.7	0
4	0	$\pi/2$	0	0
5	0	$-\pi/2$	0.5	0
6	0.2	0	0	$-\pi/2$

Параметры θ_i являются переменными и изначально равны 0. Для придания нужного нам начального положения манипулятора зададим значения θ_i .

Таим образом, создана кинетическая модель разрабатываемого манипулятора.

В среде Matlab [7] построена компьютерная модель многозвенного манипулятора. На **Рис.8** приведено графическое отображение выбранного начального положения многозвенного манипулятора.

**Рис.8** – Графическое отображение выбранного начального положения многозвенного манипулятора

Изменяя значение углов θ_i , мы можем задавать произвольное начальное положение манипулятора.

Решение прямой задачи кинематики. При решении прямой задачи кинематики (ПЗК) рассматриваются две системы координат: исходная, связанная с первым сочленением, X_0, Y_0, Z_0 и итоговая, связанная с рабочим органом манипулятора X_n, Y_n, Z_n .

Расположение двух смежных сочленений определяется тремя линейными и тремя угловыми координатами. Одна и та же точка

представлена двумя наборами координат и выражена относительно этих двух систем. Координаты связаны некоторым преобразованием, несущим информацию об ориентации в пространстве и линейном смещении одной системы относительно другой.

$$\text{Итак, имеем расширенные векторы положения } R_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ и } R_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix}$$

, которые связаны между собой соотношением

$$R_0 = T_n^0 R_n, \quad (1)$$

где T – матрица однородного преобразования, несущая информацию о линейном смещении и пространственной ориентации одной системы координат относительно другой. Матрица T_n^0 имеет размер 4x4. Матрица T_n^0 может быть представлена в виде

$$T_n^0 = \left[\begin{array}{c|c} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ \hline f_{1 \times 3} & t \end{array} \right]. \quad (2)$$

В соотношении (2) $R_{3 \times 3}$ – представляет собой матрицу вращения системы координат X_n, Y_n, Z_n относительно системы координат X_0, Y_0, Z_0 , $p_{3 \times 1}$ – вектор размерностью 3x1 линейного смещения начала координат системы X_n, Y_n, Z_n относительно X_0, Y_0, Z_0 , $f_{1 \times 3}$ – вектор размерностью 1x3, который задает преобразование перспективы; t – глобальный масштабирующий множитель.

Укажем вид обычных матриц поворота на некоторый угол β вокруг осей X, Y и Z соответственно

$$R_{x,\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad R_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$R_{z,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Однородная матрица поворота, имеющая размерность 4x4, получается соответствующим расширением обычной матрицы поворота, имеющей размерность 3x3

$$T_{x,\beta} = \begin{bmatrix} R_{x,\beta} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{y,\beta} = \begin{bmatrix} R_{y,\beta} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{z,\beta} = \begin{bmatrix} R_{z,\beta} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Верхняя правая подматрица однородной матрицы преобразования $p_{3 \times 1}$, задает параллельный перенос системы координат, и тогда, можем построить однородную матрицу элементарного сдвига вида $\begin{bmatrix} I & p_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Теперь для каждого сочленения можем определить однородную матрицу преобразования T_i , задающую последовательность преобразований: поворот вокруг оси X на угол α_i , сдвиг вдоль оси X на A_i , поворот вдоль оси Z на угол θ_i , сдвиг вдоль оси Z на d_i

$$T_i = T_{z d_i} T_{z \theta_i} T_{x A_i} T_{x \alpha_i} = \begin{bmatrix} I & p_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{z \theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & p_{A_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x \alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$T_i =$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & A_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & A_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Расчет значений матрицы преобразований, зависящей от обобщенных координат $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ осуществляется при помощи соотношения

$$T_n^0 = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6. \quad (5)$$

В результате получаем матрицу преобразования вида (2), где вектор размерностью 3×1 – вектор координат начала системы координат n -го звена манипулятора X_n, Y_n, Z_n (в нашем случае рабочего органа) относительно X_0, Y_0, Z_0 .

Вывод. Предлагаемое в статье построение кинематической схемы антропоморфного манипулятора позволяет решать задачу как прямой, так и обратной кинематики для построения траектории манипулятора. Также решение указанной задачи позволит эффективно реализовывать современные подходы к построению управления многозвенными манипуляторами с кинематической избыточностью, например, подход «Programming by demonstration».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Севастополя в рамках научного проекта № 20-41-925002.

Библиографический список

1. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // Новый оборонный заказ. Стратегии. – СПб: ООО «Дифанс-Медиа», 2019. – №5(58)
2. Denavit J.A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J.A. Denavit, R.S.Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23,1955.– pp. 215–221.
3. Corke P.I. A simple and systematic approach to assigning Denavit-Hartenberg parameters / P.I. Corke // IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, 2007, pp. 590–594.
4. Alchakov V. Basic approach to programming by demonstration for an anthropomorphic robot / V. Alchakov, V. Kramar, A. Larionenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709, 022092, 2020.– p.1–8
5. Борисов О.И. Методы управления робототехническими приложениями / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — 108 с.
6. Шаньгин Е.С. Управление роботами и робототехническими системами / Е.С. Шаньгин – Уфа, 2005. – 188 с.
7. Peter Corke Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in Matlab / P. Corke. – Springer International Publishing AG 2017.– 697 p.

Bibliograficheskiy spisok

1. FEDOR: Final Experimental Demonstration Object Research // Novii oboronniy zakaz. Strategii. – SPb: ООО «Difans media», 2019. – №5(58)
2. Denavit J.A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices / J.A. Denavit, R.S. Hartenberg // Transactions ASME Journal of Applied Mechanics, 23,1955.- pp. 215–221.
3. Corke P.I. A simple and systematic approach to assigning Denavit-Hartenberg parameters / P.I. Corke // IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, 2007, pp. 590–594.
4. Alchakov V. Basic approach to programming by demonstration for an anthropomorphic robot / V Alchakov, V Kramar, A Larionenko // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709, 022092, 2020.–p.1–8
5. Borisov O.I. Metodi upravleniya robototeknicheskimi prilogeniyami / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pirkin. — SPb.: Universitet ITMO, 2016. — 108 p.
6. Shangin E.S. Control of robots and robotic systems/ E.S. Shangin – Ufa, 2005. – 188 p.
7. Peter Corke Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in Matlab / P. Corke. – Springer International Publishing AG 2017.– 697 p.

¹Крамарь Вадим Александрович, д-р техн. наук, проф., kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

²Крамарь Олег Александрович, kramarv@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

³Путин Александр Николаевич, alexputin.dev@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

SOLUTION OF THE DIRECT PROBLEM OF KINEMATICS FOR ANTHROPOMORPHIC MANIPULATORS

V.A. Kramar, O.A. Kramar, A.N. Putin

The active introduction of anthropomorphic manipulators requires the development of new approaches and the adaptation of existing approaches to the construction of their control. One of the most important approaches is to solve the direct kinematics problem requiring the construction of a kinematic diagram of the manipulator and to describe it using the Denavit-Hartenberg approach. The article provides a systematic presentation of these issues.

Key words: anthropomorphic manipulator, the direct task of kinematics.

Kramar Vadim Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, kramarv@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Kramar Oleg Aleksandrovich, kramarv@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Putin Aleksandr Nikolaevich, alexputin.dev@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ КОЛЕБАНИЯМИ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ВИБРОПРИВОДА

Кристалль М.Г.¹, Горелова А.Ю.², Суриков А.А.³

Аннотация. Для обеспечения снабжения технологического оборудования предметами производства используют загрузочные устройства с виброприводом, реализующим эллиптический закон колебаний рабочего органа. Этот закон получают за счет смещения на некоторый фазовый угол вертикальную и горизонтальную составляющие колебаний. Для получения максимальной скорости транспортирования предметов производства требуется решить задачу планирования экстремального эксперимента с тремя факторами: амплитуды вертикальных и горизонтальных колебаний и угла сдвига между ними. Причем предложена оригинальная методика определения этого угла.

Ключевые слова. Загрузочное устройство, вибропривод, угол сдвига фазы колебаний, планирование экстремального эксперимента.

Для обеспечения высокой производительности снабжения технологического оборудования заготовками или деталями используют загрузочные устройства с виброприводом [1-4], реализующим эллиптический закон колебаний рабочего органа. Этот закон получают за счет смещения на некоторый фазовый угол вертикальную и горизонтальную составляющие колебаний.

Для получения максимальной скорости вибротранспортирования применено планирование экстремального эксперимента [5], где параметром оптимизации является искомая скорость, а в качестве факторов: амплитуды вертикальной и горизонтальной составляющих колебаний и сдвиг фаз между ними. Эксперименты проводились на экспериментальной установке (Рис.1).

Установка содержит вибробункер 1, пульт управления 2, фонарик 3, закрытый плотным экраном, в котором выполнено отверстие диаметром 0,1 мм. На кронштейне 5 закреплен оптический прибор 4. В качестве оптического прибора использован микроскоп МПБ-3, применяемый для измерения размеров отпечатков инденторов при оценке твердости материалов по Бринеллю. Величины напряжений питания электромагнитов вертикальной и горизонтальной составляющих колебаний регулировались от пульта управления 2, и были тарированы по изображению эллиптической траектории движения рабочего органа в окуляре оптического прибора 4 (Рис.2).



Рис.1 – Установка экспериментальная

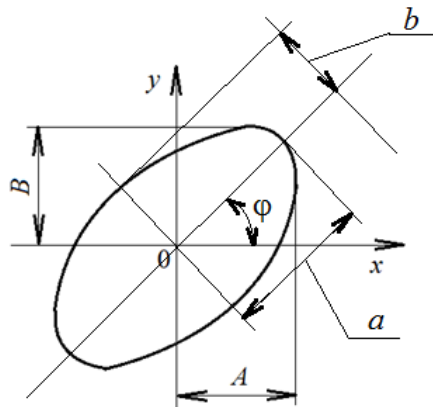


Рис.2 – Траектория эллиптических колебаний

Здесь A и B , соответственно, амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний. Причем их максимальные значения $A^{\max} = 3\text{ мм}$, $B^{\max} = 0,7\text{ мм}$.

Угол φ сдвига фаз между компонентами колебаний A и B можно вычислить в соответствии с изложенным в работе [6] по следующей процедуре:

$$1) y = B \sin t; x = A \sin(t + \varphi).$$

$$2) x = A(\cos \varphi \sin t + \sin \varphi \cos t) = A \cos \varphi \sin t + A \sin \varphi \cos t$$

Поскольку $\sin t = \frac{y}{B}$; $\cos t = \sqrt{1 - \left(\frac{y}{B}\right)^2}$, то:

$$\left(x - \frac{A}{B} y \cos \varphi\right)^2 = \frac{A^2}{B^2} (B^2 - y^2) \sin^2 \varphi \quad (1)$$

После преобразования выражения (1) получим:

$$x^2 + y^2 \frac{A^2}{B^2} - 2x \frac{A}{B} y \cos \varphi - A^2 \sin^2 \varphi = 0. \quad (2)$$

В общем случае выражение (2) есть квадратичная форма вида[3]:

$$a_{11}^2 x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0,$$

где $a_{11} = 1$; $a_{22} = \left(\frac{A}{B}\right)^2$; $a_{12} = \frac{A}{B} \cos \varphi$; $a_{33} = A^2 \sin^2 \varphi$.

Тогда, параметры I, D, L равны [7]:

$$I = a_{11} + a_{22}, D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, L = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

$$I = 1 + \left(\frac{A}{B}\right)^2; D = \left(\frac{A}{B}\right)^2 \sin^2 \varphi; L = -\left(\frac{A}{B}\right)^2 \cos^2 \varphi (-A^2 \sin^2 \varphi).$$

Так как

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \text{ то}$$

$$\lambda^2 - I\lambda + D = 0 \quad (3)$$

Поскольку решение уравнения (3) имеет вид:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1 + \left(\frac{A}{B}\right)^2}{2} \pm \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{A}{B}\right)^2}{4} - \left(\frac{A}{B}\right)^2 \sin^2 \varphi},$$

то величины a и b полуосей канонического уравнения эллипса вычисляют по формулам: $a^2 = -\frac{1}{\lambda_2} \frac{A}{D} = -\frac{A}{\lambda_1 \lambda_2^2}$; $b^2 = -\frac{1}{\lambda_1} \frac{A}{D} = -\frac{A}{\lambda_2 \lambda_1^2}$, а отношение

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}.$$

В результате получаем систему уравнений:

$$a = \sqrt{\frac{B^2 A^3 \cos \varphi + A^4 B^2 - B^5 \operatorname{ctg} \varphi - B^5 A^5 \sin \varphi}{B^3 A^2}}; b = \frac{B}{A} \sqrt{\frac{B^2}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\sin^2 \varphi}}. (4)$$

Из решения системы уравнений (4) получаем величину угла φ сдвига фаз между горизонтальной и вертикальной составляющими эллиптического закона колебаний.

Нами предложен более простой метод вычисления фазового сдвига φ

Из выражения (2), поочередно приняв $x = 0$ и $y = 0$, получим согласно

Рис.3:

$x = \pm A \sin \varphi = \gamma$; $y = \pm B \sin \varphi = \varepsilon$, тогда угол сдвига фаз между колебаниями определяем по одному из выражений:

$$\varphi = \arcsin \frac{\gamma}{A} = \arcsin \frac{\varepsilon}{B}.$$

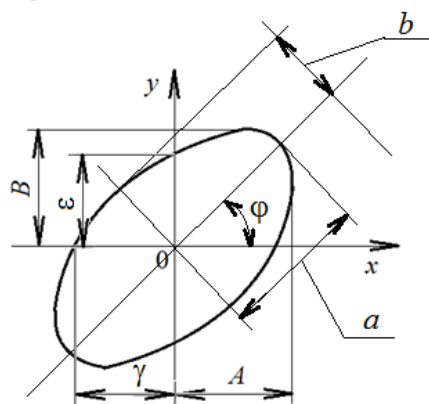


Рис.3 – К определению величины угла φ сдвига фаз между колебаниями

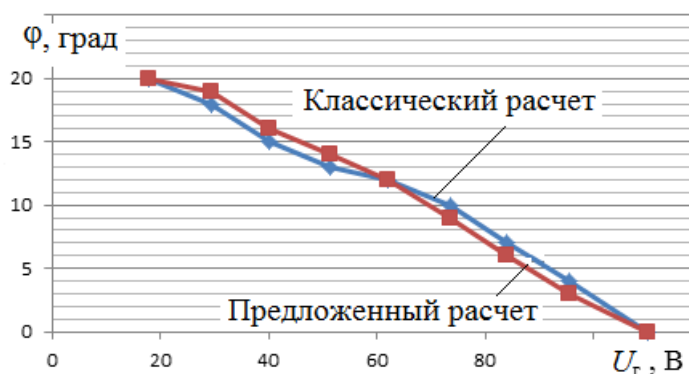


Рис.4 – Зависимость угла сдвига фаз от напряжения на обмотке электромагнита горизонтальных колебаний

Перед проведением экспериментальных исследований была выполнена тарировка по значениям напряжений U_T и U_B величин амплитуд A и B , соответственно горизонтальной и вертикальной составляющих колебаний, а также угла φ сдвига фаз между ними. На **Рис.4** представлено сравнение зависимостей этого угла, рассчитанных по классическому и предложенному методу.

Для поиска максимума скорости вибротранспортирования был проведен дробный факторный эксперимент типа 2^{4-1} для трех факторов.

Методом Бокса-Уилсона [5], была достигнута зона оптимума, где скорость транспортирования эталонной детали составляла 650 мм/с, при значениях: амплитуды горизонтальных колебаний $A = 3$ мм, амплитуды вертикальных колебаний $B = 0,4$ мм и угле сдвига фаз $\varphi = 60^\circ$.

Библиографический список

1. Антипов В.И. О принципах создания энергосберегающих вибрационных машин / В.И. Антипов, В.К. Асташёв // Вестник научно-технического развития. – 2008. – № 1(5). – С. 9.
2. Артоболевский И.И. О машинах вибрационного действия / И.И. Артоболевский, А.П. Бессонов, А.В. Шляхтин. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 47 с.
3. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем / В.И. Бабицкий. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
4. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д, 1999. – 621 с.
5. Кристалль М.Г. Обработка результатов планирования экстремального эксперимента: учеб. пособие / М.Г. Кристалль, А.Ю. Горелова. – ВолгГТУ, - Волгоград, 2019. – 70 с.
6. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний / Р. Мэнли. – М.: Машиностроение. – 1972. – 366 с.
7. Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Т. Корн, Г. Корн – М.: Наука, 1974. – 832 с.

Bibliograficheskiy spisok

1. Antipov V.I. O principah sozdaniya energosberegayushchih vibracionnyh mashin / V.I. Antipov, V.K. Astashyov // Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya. – 2008. – № 1(5). – S. 9.
2. Artobolevskij I.I. O mashinah vibracionnogo dejstviya / I.I. Artobolevskij, A.P. Bessonov, A.V. SHlyahtin. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1956. – 47 s.
3. Babickij V.I. Teoriya vibroudarnyh sistem / V.I. Babickij. – M.: Nauka, 1978. – 352 s.
4. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tekhnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D, 1999. – 621 s.
5. Kristal' M.G. Obrabotka rezul'tatov planirovaniya ekstremal'nogo eksperimenta: ucheb. posobie / M.G. Kristal', A.YU. Gorelova. – VolgGTU, - Volgograd, 2019. – 70 s.
6. Menli R. Analiz i obrabotka zapisej kolebanij / R. Menli. – M.: Mashinostroenie. – 1972. – 366 s.
7. Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov / T. Korn, G. Korn – M.: Nauka, 1974. – 832 s.

¹*Кристалль Марк Григорьевич, д-р техн. наук, проф., crysmar@mail.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет*

²Горелова Ася Юрьевна, канд. техн. наук, доцент,
asya.gorelowa@yandex.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский
государственный технический университет

³Суриков Алексей Андреевич, бакалавр, студент,
vstu.atp.student@gmail.com, Россия, Волгоград, Волгоградский
государственный технический университет

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF A PHASE SHIFT ANGLE
BETWEEN VIBRATIONS OF A TWO-COMPONENT VIBRATOR**

M.G. Kristal, A.Y. Gorelova, A.A. Surikov

To ensure the supply of technological equipment with production work pieces, feeding devices with a vibratory drive that implement the elliptical law of the labour body vibrations are used. This law is obtained by shifting the vertical and horizontal components of the oscillations by a certain phase angle. To obtain the maximum speed of transportation of production work pieces, the task of planning an extreme experiment with three factors was solved: the amplitudes of vertical and horizontal vibrations and the angle of shift between them. Moreover, an original method for determining this angle is proposed.

Keywords: feeding device, vibratory drive, phase angle of oscillation, planning an extreme experiment.

Kristal Mark Grigorevich, doctor of technical sciences, professor, cysmar@mail.ru, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

Gorelova Asya, Yurievna, candidate of technical sciences, docent, asya.gorelowa@yandex.ru, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

Surikov Alexey Andretvich, bachelor, student, vstu.atp.student@gmail.com, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ КАЧЕСТВЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Заморёнов М.В.¹, Пичугова Т.Б.²

Аннотация. В статье рассмотрена эволюционирующая системы, в которой качественно изменяются характеристики ее элементов. Приведен граф такой системы для неограниченного количества состояний, а также система дифференциальных уравнений Колмогорова для определения вероятностей состояний. Приведен граф системы, оборудование в которой имеет четыре стадии устаревания, составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова, а также получена система уравнений для определения финальных вероятностей. Проведено моделирование процесса функционирования эволюционирующей системы.

Ключевые слова. Марковская модель, эволюционирующая система, финальные вероятности, уравнения Колмогорова.

В настоящее время на производственных предприятиях сложилась ситуация, когда большое количество оборудования имеет различные скорости старения и, в связи с этим, увеличение времени обслуживания и стоимости ремонта. Из сложившегося опыта эксплуатации соответствующего оборудования известна скорость его старения, однако не существует доступного математического обеспечения, позволяющего лицу, принимающему решения, выносить обоснованные предложения по замене или масштабной модернизации такого оборудования.

Целью данной статьи является задача построения Марковской модели [1, 2, 3, 4, 5] процесса функционирования производственной системы с учетом качественного изменения характеристик оборудования, входящего в эту систему.

Объектом моделирования является эволюционирующая система, оборудование которой проходит различные этапы устаревания, а в связи с этим и удорожания эксплуатации и ремонта.

Интенсивности перехода оборудования из одной категории в другую – λ_i^{i+1} , где $i = \overline{1, N-1}$, причем N – количество категорий устаревания оборудования. Интенсивности утилизации оборудования – λ_i^0 , где $i = \overline{1, N}$. Интенсивность закупки нового оборудования – λ_0^1 . Интенсивности, когда оборудование остается в той же категории – λ_i^i , где $i = \overline{1, N}$.

Граф такой системы представлен на **Рис.1**.

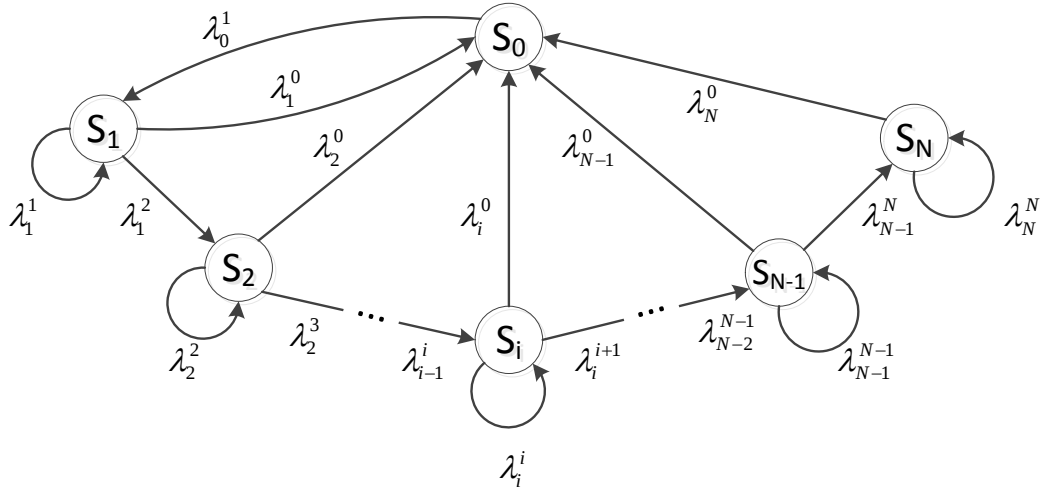


Рис.1 – Граф системы, оборудование которой проходит различные этапы устаревания

Система дифференциальных уравнений Колмогорова [6, 7, 8] для определения вероятностей состояний системы представленной на **Рис.1** имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = P_1 \cdot \lambda_1^0 + P_2 \cdot \lambda_2^0 + P_3 \cdot \lambda_3^0 + P_4 \cdot \lambda_4^0 + P_5 \cdot \lambda_5^0 - P_0 \cdot \lambda_0^1 \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = P_0 \cdot \lambda_0^1 + P_1 \cdot \lambda_1^1 - P_1 \cdot \lambda_1^0 - P_1 \cdot \lambda_1^2 \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = P_1 \cdot \lambda_1^2 + P_2 \cdot \lambda_2^2 - P_2 \cdot \lambda_2^0 - P_2 \cdot \lambda_2^3 \\ \dots \\ \frac{dP_i(t)}{dt} = P_{i-1} \cdot \lambda_{i-1}^i + P_i \cdot \lambda_i^i - P_i \cdot \lambda_i^0 - P_i \cdot \lambda_i^{i+1} \\ \dots \\ \frac{dP_{N-1}(t)}{dt} = P_{N-2} \cdot \lambda_{N-2}^{N-1} + P_{N-1} \cdot \lambda_{N-1}^{N-1} - P_{N-1} \cdot \lambda_{N-1}^0 - P_{N-1} \cdot \lambda_{N-1}^N \\ \frac{dP_N(t)}{dt} = P_{N-1} \cdot \lambda_{N-1}^N + P_N \cdot \lambda_N^N - P_N \cdot \lambda_N^0 \end{array} \right.$$

Построим модель системы, в которой имеется 4 категории устаревания оборудования. Граф такой системы будет иметь вид (**Рис.2**):

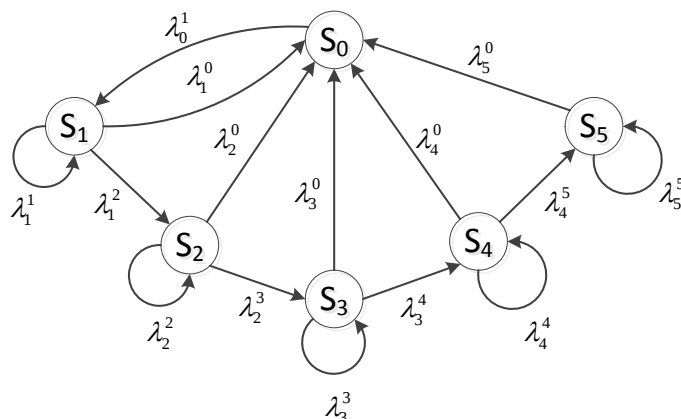


Рис.2 – Граф системы, оборудование которой проходит 4 этапа устаревания

Опишем состояния системы:

S_0 – состояние, в котором оборудование утилизировано или еще не куплено.

S_1 – состояние, соответствующее новому оборудованию.

S_2 – состояние, соответствующее 1-й категории устаревания.

S_3 – состояние, соответствующее 2-й категории устаревания.

S_4 – состояние, соответствующее 3-й категории устаревания.

S_5 – состояние, соответствующее 4-й категории устаревания.

Для определения качественного состава оборудования необходимо составить и решить систему уравнений Колмогорова для определения финальных вероятностей.

Система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = P_1 \cdot \lambda_1^0 + P_2 \cdot \lambda_2^0 + P_3 \cdot \lambda_3^0 + P_4 \cdot \lambda_4^0 + P_5 \cdot \lambda_5^0 - P_0 \cdot \lambda_0^1 \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = P_0 \cdot \lambda_0^1 + P_1 \cdot \lambda_1^1 - P_1 \cdot \lambda_1^0 - P_1 \cdot \lambda_1^2 \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = P_1 \cdot \lambda_1^2 + P_2 \cdot \lambda_2^2 - P_2 \cdot \lambda_2^0 - P_2 \cdot \lambda_2^3 \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = P_2 \cdot \lambda_2^3 + P_3 \cdot \lambda_3^3 - P_3 \cdot \lambda_3^0 - P_3 \cdot \lambda_3^4 \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = P_3 \cdot \lambda_3^4 + P_4 \cdot \lambda_4^4 - P_4 \cdot \lambda_4^0 - P_4 \cdot \lambda_4^5 \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = P_4 \cdot \lambda_4^5 + P_5 \cdot \lambda_5^5 - P_5 \cdot \lambda_5^0 \end{array} \right. \quad (1)$$

Для поиска финальных вероятностей необходимо в системе (1) приравнять левые части к нулю. Тогда система (1) будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = P_1 \cdot \lambda_1^0 + P_2 \cdot \lambda_2^0 + P_3 \cdot \lambda_3^0 + P_4 \cdot \lambda_4^0 + P_5 \cdot \lambda_5^0 - P_0 \cdot \lambda_0^1 \\ 0 = P_0 \cdot \lambda_0^1 + P_1 \cdot \lambda_1^1 - P_1 \cdot \lambda_1^0 - P_1 \cdot \lambda_1^2 \\ 0 = P_1 \cdot \lambda_1^2 + P_2 \cdot \lambda_2^2 - P_2 \cdot \lambda_2^0 - P_2 \cdot \lambda_2^3 \\ 0 = P_2 \cdot \lambda_2^3 + P_3 \cdot \lambda_3^3 - P_3 \cdot \lambda_3^0 - P_3 \cdot \lambda_3^4 \\ 0 = P_3 \cdot \lambda_3^4 + P_4 \cdot \lambda_4^4 - P_4 \cdot \lambda_4^0 - P_4 \cdot \lambda_4^5 \\ 0 = P_4 \cdot \lambda_4^5 + P_5 \cdot \lambda_5^5 - P_5 \cdot \lambda_5^0 \end{array} \right. \quad (2)$$

Следует отметить, что система (2) состоит из однородных уравнений и для ее решения необходимо ввести уравнение нормировки:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 \quad (3)$$

Заменяя любое, а в нашем случае первое, уравнение в системе (2) на уравнение нормировки (3), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1 \\ 0 = P_0 \cdot \lambda_0^1 + P_1 \cdot \lambda_1^1 - P_1 \cdot \lambda_1^0 - P_1 \cdot \lambda_1^2 \\ 0 = P_1 \cdot \lambda_1^2 + P_2 \cdot \lambda_2^2 - P_2 \cdot \lambda_2^0 - P_2 \cdot \lambda_2^3 \\ 0 = P_2 \cdot \lambda_2^3 + P_3 \cdot \lambda_3^3 - P_3 \cdot \lambda_3^0 - P_3 \cdot \lambda_3^4 \\ 0 = P_3 \cdot \lambda_3^4 + P_4 \cdot \lambda_4^4 - P_4 \cdot \lambda_4^0 - P_4 \cdot \lambda_4^5 \\ 0 = P_4 \cdot \lambda_4^5 + P_5 \cdot \lambda_5^5 - P_5 \cdot \lambda_5^0 \end{array} \right.$$

Уравнения данной системы являются алгебраическими, поэтому решение такой системы не представляет сложности и не приводится ввиду особой громоздкости.

Результаты моделирования следующие.

Исходными данными для моделирования служат интенсивности переходов между состояниями на графе:

$$\begin{aligned} \lambda_1^1 &= 2ед / год; \lambda_1^2 = 15ед / год; \lambda_1^0 = 10ед / год; \\ \lambda_2^2 &= 10ед / год; \lambda_2^3 = 15ед / год; \lambda_2^0 = 5ед / год; \\ \lambda_3^3 &= 8ед / год; \lambda_3^4 = 10ед / год; \lambda_3^0 = 14ед / год; \\ \lambda_4^4 &= 5ед / год; \lambda_4^5 = 10ед / год; \lambda_4^0 = 15ед / год; \\ \lambda_5^5 &= 20ед / год; \lambda_5^0 = 5ед / год; \lambda_5^0 = 30ед / год. \end{aligned}$$

Финальные вероятности исследуемой системы получились следующие:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = 0.2158207687 \\ P_1 = 0.1798506406 \\ P_2 = 0.2452508735 \\ P_3 = 0.2163978296 \\ P_4 = 0.1030465855 \\ P_5 = 0.03963330212 \end{array} \right.$$

Полученные результаты позволяют определить процентное соотношение количества оборудования в каждой из категорий устаревания. В дальнейших исследованиях планируется использовать данную модель для определения путей повышения сроков использования устаревающего оборудования. Также для случая непрерывного устаревания оборудования планируется получить решение уравнений Колмогорова в дифференциальной форме.

Библиографический список

1. Марков А.А. Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга / А.А. Марков // Известия физико-математического общества при Казанском университете. 2-я серия. Т. 15. (1906) – С. 135–156.
2. Кельберт М. Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов – М.: МЦНМО, 2009. – 295 с.: ил.
3. Гмурман В.Е.: Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман – М.: Высшее образование: Юрайт, 2009 – 480 с..
4. Феллер В.: Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер – М.: Мир, 1984 – 512 с.
5. Семенчин Е.А.: Теория вероятностей в примерах и задачах / Е.А. Семенчин – СПб.: Лань, 2007 – 352 с.
6. Вентцель Е.С.: Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель – М.: Академия, 2003 – 441 с.
7. Кирпичников А.П.: Прикладная теория массового обслуживания / А.П. Кирпичников – Казань: Казанский государственный университет, 2008 – 118 с.
8. Кирпичников А.П.: Методы прикладной теории массового обслуживания / А.П. Кирпичников – Казань: Казанский государственный университет, 2011 – 224 с.

Bibliograficheskij spisok

1. Markov A.A. Rasprostranenie zakona bol'shih chisel na velichiny, zavisyashchie drug ot druga / A.A. Markov // Izvestiya fiziko-

- matematicheskogo obshchestva pri Kazanskom universitete. 2-ya seriya. T. 15. (1906) – S. 135–156.
2. Kel'bert M. YA. Veroyatnost' i statistika v primerah i zadachah. T. II: Markovskie cipi kak otpravnyaya tochka teorii sluchajnyh processov i ih prilozheniya / M.YA. Kel'bert, YU.M. Suhov – M.: MCNMO, 2009. – 295 s.:il.
 3. Gmurman V.E.: Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika / V.E. Gmurman – M.: Vysshee obrazovanie: YUrajt, 2009 – 480 s..
 4. Feller V.: Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ee prilozheniya / V. Feller – M.: Mir, 1984 – 512 s.
 5. Semenchin E.A.: Teoriya veroyatnostej v primerah i zadachah / E.A. Semenchin – SPb.: Lan', 2007 – 352 s.
 6. Ventcel' E.S.: Teoriya sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozheniya / E.S. Ventcel' – M.: Akademiya, 2003 – 441 s.
 7. Kirpichnikov A.P.: Prikladnaya teoriya massovogo obsluzhivaniya / A.P. Kirpichnikov – Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj universitet, 2008 – 118 s.
 8. Kirpichnikov A.P.: Metody prikladnoj teorii massovogo obsluzhivaniya / A.P. Kirpichnikov – Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj universitet, 2011 – 224 s.

¹Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

²Пичугова Татьяна Борисовна, магистрант 2-го года обучения, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

**ANALYTICAL MODELING OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF
THE EVOLUTING SYSTEM AT THE QUALITATIVE CHANGE OF
CHARACTERISTICS OF ITS ELEMENTS.**

M.V. Zamoryonov, T.B. Pichugova

The article considers an evolving system in which the characteristics of its elements change qualitatively. A graph of such a system is given for an unlimited number of states, as well as a system of Kolmogorov differential equations for determining state probabilities. A graph of the system is presented, the equipment in which has four stages of obsolescence, a system of Kolmogorov differential equations is compiled, and a system of equations for determining the final probabilities is obtained. The modeling of the process of functioning of an evolving system is carried out.

Keywords: *Markov model, evolving system, final probabilities, Kolmogorov equations*

*Zamoryonov Mikhail Vadimovich, candidate of technical sciences, docent,
zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University;*

*Pichugova Tatyana Borisovna, second year master's student, Russia,
Sevastopol, Sevastopol State University*

УДК 681.2.08

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ТИПА «СОПЛО-ПРИЕМНЫЙ КАНАЛ»**

Васютенко А.П.¹, Волошина Н.А.²

Аннотация. Приводятся аналитические зависимости, описывающие работу преобразователя «сопло-приемный канал» схема установки и результаты экспериментального исследования статических характеристик пневматического преобразователя типа «сопло – приемный канал». Для обеспечения достоверности экспериментальных данных в схеме экспериментальной установки используются высокоточные средства измерений, в частности образцовые манометры класса точности 1.0 и измерительная головка медель.1 МИГ (погрешность измерения 2,5 мкм, вариация показаний $\pm 0,5$ мкм). Приводятся экспериментальные зависимости $P_k = f(x)$ давления воздуха в приемном канале преобразователя от зазора x между торцами сопла и приемного канала и дана оценка соответствия теоретических и экспериментальных зависимостей $P_k = f(x)$, значений прямолинейных участков и пневматических передаточных отношений.

Ключевые слова. Измерение, сопло-приемный канал, преобразователь, статическая характеристика, схема, экспериментальная установка.

Пневматические преобразователи широко применяются для измерения геометрических параметров деталей в машинно-приборостроении. Известны различные виды первичных пневматических преобразователей в зависимости от конструкции измерительного сопла и заслонки: сопло-плоская заслонка, сопло-коническая заслонка, шариковое сопло-плоская заслонка, широкопредельный преобразователь плунжерного типа, эжекторное сопло.

В работах [1,2] на основе анализа результатов моделирования статических характеристик показана возможность применения пневматических преобразователей типа, «сопло-приемный канал» для контроля геометрических параметров деталей, обеспечения более широкого диапазона измерения по сравнению с пневматическими преобразователями типа «сопло-заслонка». Пределы измерения преобразователя «сопло-заслонка» составляют $\Delta x = 0.02...0.17$ мм, а преобразователя «сопло – приемный канал» согласно результатов моделирования лежат в пределах $\Delta x = 0.4...0.9$ мм. Расширение пределов измерения пневматических преобразователей увеличивает область их использования и позволяет

контролировать геометрические параметры нескольких ступеней валиков приборных устройств при одной наладке измерительной оснастки.

Теоретическая зависимость, описывающая работу преобразователя «сопло-приемный канал» с глухой пневмокамерой постоянного объема, получена на основе анализа трех аэрогидродинамических явлений: соударение струй, эффект Коанда и турбулизация ламинарного потока в результате внешних возмущений. Турбулентное течение свободной струи характеризуется гораздо большей шириной струи, чем ламинарное. Это приводит к уменьшению осевой скорости турбулентной струи [3,4].

Струйные преобразователи можно условно разделить на аналоговые и дискретные. Наибольшее развитие получили дискретные струйные преобразователи. Струйные преобразователи подразделяются также на активные и пассивные. К активным преобразователям подводится питание от внешнего источника, а к пассивным внешнее питание не подводится; в них используется только энергия входных управляющих сигналов.

Статическая характеристика $P_k = f(x)$ аналогового активного струйного пневматического преобразователя для начального участка струи описывается, выражением:

$$P_{k,Q=0} = \psi \left[c_1 - c_2 \cdot \frac{D_T}{D_0} + c_3 \cdot \frac{1}{\left(\frac{D_T}{D_0}\right)} - c_4 \cdot \frac{1}{\left(\frac{D_T}{D_0}\right)^2} \right] \cdot P_{пит},$$

где:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= 1 + \frac{1 - 0,2 \cdot \frac{x}{D_0}}{\frac{x}{D_0}}; & c_2 &= 1 + 0,0039 \cdot \left(\frac{x}{D_0}\right)^3; \\ c_3 &= \frac{(0,5 - 0,1 \cdot \frac{x}{D_0})^2}{0,252 \cdot \frac{x}{D_0}}; & c_4 &= \frac{(0,5 - 0,1 \cdot \frac{x}{D_0})^3}{0,126 \cdot \frac{x}{D_0}}; \end{aligned} \right\},$$

x – расстояние между торцами входного сопла и приемного канала D_0 – диаметр входного сопла; D_T – диаметр приемного канала; P_k – давление воздуха в приемном канале; $P_{пит}$ – давление питания воздуха.

Моделирование статических характеристик $P_{k,Q=0} = f(x)$ преобразователя типа «сопло – приемный канал» проводилось при различных сочетаниях давление воздуха $P_{пит}$ и конструктивных параметров, значения которых указаны в **таблице 1**.

Таблица 1. – Геометрические параметры пневматического преобразователя

$P_{\text{пит}},$ МПа	0.05	0.1	0.15	0.2	
X, мм	0.5	1	1.5	2	2.5
$D_o,$ мм	0.5	1.0	1.2	1.5	
$D_{т,},$ мм	1	2	4	5	

Результаты моделирования показали, что передаточные отношения дроссельного пневматического преобразователя типа «сопло – приемный канал» лежат в пределах $K_z = 0,065 - 0,444$ МПа/мм, диапазоны измерения ΔX преобразователей типа «сопло - приемный канал» $X=0.4-0.9$ мм при $P_{k,Q=0}=0.1$ и 0.15 МПа соответственно.

С целью оценки влияния некоторых допущений, принятых при выводе теоретических зависимостей, описывающих работу преобразователя (квазистационарность процессов, протекающих в устройствах, постоянство коэффициентов расхода, неизменность величины рабочего давления воздуха, пренебрежение в ряде случаев влиянием теплообмена с окружающей средой) на его реальные характеристики проведены экспериментальные исследования зависимостей $P_{k,Q=0} = f(x)$.

Экспериментальная установка (**Рис.1**) показана спроектированная на базе стойки вертикального интерферометра, которая включает в себя: собственно стойку 1, регулируемый в вертикальном направлении с помощью винта 5, столик 6 и кронштейн 2 с хомутом 12. Кронштейн 2 служит для крепления измерительной головки 3 и входного сопла 7.

Дроссельный пневматический преобразователь типа «сопло – приемный канал» состоит из входного сопла 7 и приемного канала 8, который крепится на столике 6. Входное сопло 7 крепится в хомуте 12 и фиксируется при помощи винта 4, что обеспечивает возможность регулировки его начального положения. В свою очередь хомут крепится к стойке 1 посредством кронштейна 2. Для измерения величины зазора и линейных перемещений измерительного сопла или приемного канала вдоль оси преобразователя «сопло – приемный канал», используется многооборотная измерительная головка 3, которая так же крепится на кронштейне 2. Корпус приемного канала расположен на измерительном столике 6 и крепится к нему при помощи кронштейна 9. Вертикальное перемещение столика можно регулировать с помощью винтовой пары 5.

Подача сжатого воздуха во входное сопло 7 осуществляется от блока подготовки воздуха 11, который состоит из фильтра-влагодетелителя 17, регулятора-стабилизатора давления воздуха 16, манометра 15 и фильтра тонкой очистки 14.

На выходе блока подготовки воздуха установлен образцовый манометр 10 [5-7]. При изменении расстояния между измерительным соплом и приемным каналом меняется давление в приемной камере 13, которое фиксируется образцовым манометром 18. В **таблице 2**, указаны метрологические характеристики измерительной головки 3 и манометров 18 и 10.

Таблица 2. – Метрологические характеристики измерительных средств

Наименование	Модель	Пределы измерения	Погрешность
Манометр образцовый	11202	0...0,16 МПа	1,0%
		0...0,25 МПа	
Головка измерительная	1МИГ	0...1 мм	2,5 мкм

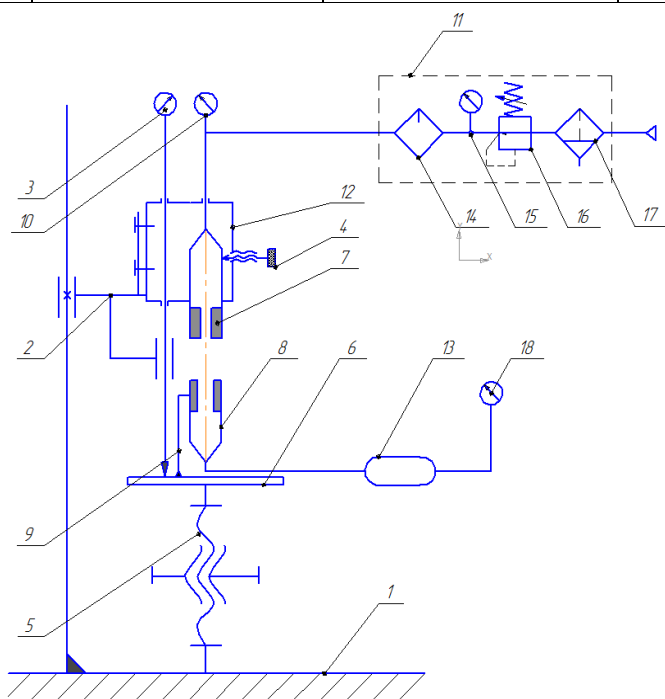


Рис.1 – Схема экспериментальной установки

Результаты экспериментальных исследований статических характеристик.

Экспериментальные исследования проводились при следующих параметрах преобразователя: диаметр входного сопла $D_0=1,5\text{мм}$, диаметр приемного канала $D_T=4\text{мм}$, рабочее давление воздуха $P_{\text{num}}=0,1$ и $0,15\text{Мпа}$.

Результаты исследования статических характеристик $P_k = f(x)$, пневматических передаточных отношений k_x и диапазонов измерения Δx представлены в **таблицах 3 и 4**.

Таблица 3. – Значения зависимости $P_k = f(x)$

$P_{\text{num}},$ МПа	$X, \text{ мм}$					
	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Расчетные данные						
0,1	96700	10200	2660	7020	9300	10800
0,15	145050	45920	4000	10530	13950	16200
Экспериментальные данные						
0,1	62000	6400	6400	6000	6200	7300
0,15	102000	61400	5800	6100	6400	9500

Таблица 4.– Значения k_x и Δx

Вид данных	$k_x, \text{МПа/мм}$		$\Delta x, \text{мм}$	
	$P_{\text{num}}, \text{МПа}$			
	0,1	0,15	0,1	0,15
Расчетны	0,216	0,271	0,4	0,4
Экспериментальные	0,18	0,1	0,4	0,7

На **Рис.2,3** показаны теоретические и экспериментальные зависимости $P_k = f(x)$ давления воздуха P_k в приемном канале преобразователя от расстояния x между торцами сопла и приемного канала.

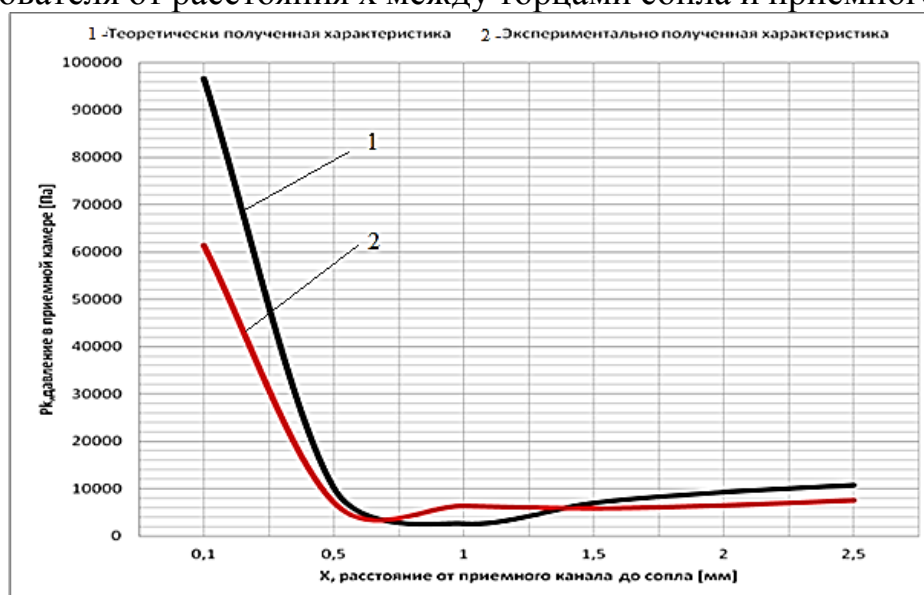


Рис.2– Графики зависимости $P_k = f(x)$ при постоянном давлении $P_{\text{num}}=0,1$ МПа, диаметре входного сопла $D_o=1,5$ мм и диаметре приемной камеры $D_r=4,0$ мм

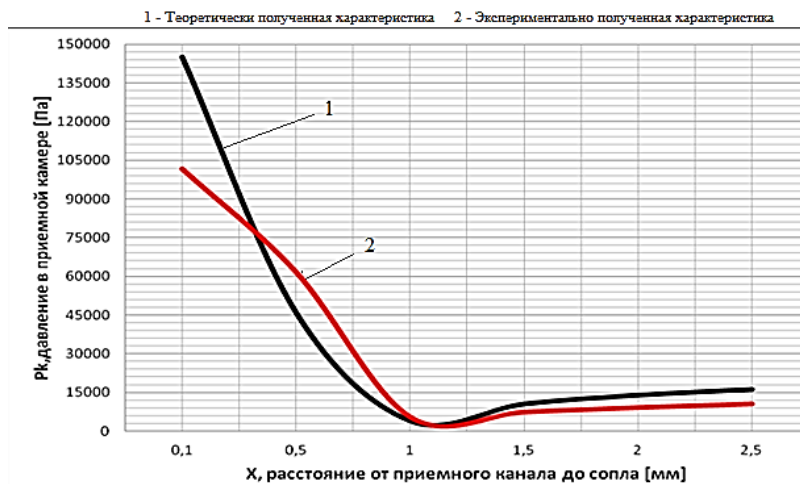


Рис.3– Графики изменения давления P_k в зависимости от расстояния x , при постоянном давлении $P_{пит}=0,15$ МПа, при диаметре входного сопла $D_o=1,5$ мм и диаметре приемной камеры $D_T=4,0$ мм

Заключение

1. Сравнительный анализ графических теоретических зависимостей и по экспериментальным данным показали удовлетворительные результаты их соответствия. Расхождение между теоретически рассчитанными и экспериментальными значениями давлений в приемной камере пневматического преобразователя не превысило 30—35% во всем диапазоне зазоров $x=0...0.9$ (мм) между входным соплом и приемным каналом на прямолинейном участке характеристики.

2. Значение пределов измерений Δx на прямолинейном участке теоретической и экспериментальной характеристик составили $\Delta x=0.4$ мм при давлении воздуха $P_{k,Q=0}=0,1$ МПа и $\Delta x=0.7$ при давлении $P_{k,Q=0}=0.15$ МПа. При этом пневматическое передаточное отношение составило $K_x=0.216$ МПа/мм при давлении питания $P_{k,Q=0}=0.1$ МПа и $K_x=0.268$ МПа/мм при давлении питания $P_{k,Q=0}=0.15$ МПа. Таким образом, увеличение давления питания $P_{k,Q=0}$ от 0.1 до 0.15 МПа позволило увеличить прямолинейный участок характеристики в 1.6 раза, а пневматическое передаточное отношение K_x в 1.25 раза.

3. В пневматических измерительных преобразователях типа «сопло - заслонка» значение пневматических передаточных отношений при рабочем давлении воздуха 0.1 МПа составляет $K_x=1.88-0.13$ МПа/мм, а при давлении 0.15 МПа $K_x=2.46-0.2$ МПа/мм. Результаты исследования показали что, передаточные отношения дроссельного пневматического преобразователя типа «сопло – приемный канал» соответствуют нижним пределам K_x пневматических измерительных преобразователей типа «сопло - заслонка». Пределы измерения ΔX у преобразователей типа

«сопло – заслонка» лежат в интервале 0.024-0.1мм (при $P=0.1$ МПа) и 0.04-0.130 мм (при $P=0.15$ МПа), а у преобразователей типа «сопло-приемный канал» 0,4-0,7 мм при $P=0,1$ и 0.15 МПа соответственно. Таким образом, применение преобразователей типа «сопло-приемный канал» позволяет в 4 раза увеличить прямолинейный участок характеристики.

Библиографический список

1. Васютенко, А.П. Дроссельный пневматический преобразователь типа «сопло-приемный канал» / А.П. Васютенко, Л.В. Ефремова, А.Ю. Тараховский // Материалы конф. Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки. North Charleston, USA, 12-13 декабря 2016 г. – North Charleston :Изд-во CreateSpace, 2016. – С. 109–114.
2. Васютенко, А.П. Моделирование характеристик пневматического преобразователя «сопло–приемный канал» / А.П. Васютенко, Л.В. Ефремова // Материалы междунар. науч.-техн. конф. Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения материалы. Севастополь, 11-15 сентября 2017 г. – Севастополь : Изд-во СевГУ, 2017. – С. 122-124.
3. Елимелех И.М. Струйная автоматика (пневмоника) / И.М. Елимелех, Ю.Г. Сидоркин – Л.: ЛЕНИЗДАТ, 1972. – 160с.
4. Залманзон Л.А. Пневмоника / Л.А. Залманзон – М.: АН СССР, 1964. – 280 с.
5. Элементы привода приборов. Расчет, конструирование, технологии / В.Е. Старжинский [и др.]. — Электрон. текстовые данные.— Минск: Белорусская наука, 2012.— 769 с.— URL: <http://www.iprbookshop.ru/12331>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
6. Тищенко О.Ф. Элементы приборных устройств. Основной курс. в 2-х частях / О.Ф. Тищенко [и др.]. – М.: «Высшая школа», 2009. – 568с.
7. Пашков Е.В. Электропневматика в производственных процессах: Учебное пособие / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский, А.А. Четверкин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 496с.

Bibliograficheskij spisok

1. Vasyutenko, A.P. Drossel'nyj pnevmaticheskij preobrazovatel' tipa «soplo-priemnyj kanal» / A.P. Vasyutenko, L.V. Efremova, A.YU. Tarahovskij // Materialy konf. Fundamental'naya nauka i tekhnologii - perspektivnye razrabotki. North Charleston, USA, 12-13 dekabrya 2016 g. – North Charleston :Izd-vo CreateSpace, 2016. – S. 109–114.
2. Vasyutenko, A.P. Modelirovanie harakteristik pnevmaticheskogo preobrazovatelya «soplo–priemnyj kanal» / A.P. Vasyutenko, L.V. Efremova // Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Avtomatizaciya i priborostroenie: problemy, resheniya materialy. Sevastopol', 11-15 sentyabrya 2017 g. – Sevastopol' : Izd-vo SevGU, 2017. – S. 122-124.

3. Elimelekh I.M. Strujnaya avtomatika (pnevmonika) / I.M. Elimelekh, YU.G. Sidorkin – L.: LENIZDAT, 1972. – 160s.
4. Zalmanzon L.A. Pnevmonika / L.A. Zalmanzon – M.: AN SSSR, 1964. – 280 s.
5. Elementy privoda priborov. Raschet, konstruirovaniye, tekhnologii / V.E. Starzhinskij [i dr.]. — Elektron. tekstovye dannye.— Minsk: Belorusskaya nauka, 2012.— 769 s.— URL: <http://www.iprbookshop.ru/12331>.— EBS «IPRbooks», po parolyu
6. Tishchenko O.F. Elementy pribornyyh ustrojstv. Osnovnoj kurs. v 2-h chastyah / O.F. Tishchenko [i dr.]. – M.: «Vysshaya shkola», 2009. – 568s.
7. Pashkov E.V. Elektropnevmatika v proizvodstvennyh processah: Uchebnoe posobie / E.V. Pashkov, YU.A. Osinskij, A.A. CHetverkin. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2003. – 496s.

¹Васютенко Александр Павлович – Севастопольский государственный университет, Политехнический институт, Севастополь, ул. Университетская, 33

²Волошина Наталья Александровна – Севастопольский государственный университет, Политехнический институт, Севастополь, ул. Университетская, 33

RESEARCH OF PNEUMATIC CONVERTER TYPE "NOZZLE RECEIVING CHANNEL"

A.P. Vasyutenko, N.A. Voloshina

Theoretical dependences are described that describe the operation of the "nozzle-receiving channel" transducer, the installation diagram, and the results of an experimental study of the static characteristics of the pneumatic transducer of the "nozzle-receiving channel" type. To ensure the reliability of the experimental data, the experimental setup uses high-precision measuring instruments, in particular, standard gauges of accuracy class 1.0 and a measuring head 1 MIG (measurement error $2.5 \mu\text{m}$, variation of readings $\pm 0.5 \mu\text{m}$). The experimental dependences of the air pressure in the receiving channel of the converter on the gap x between the ends $P_k = f(x)$ of the nozzle and the receiving channel are given, and the correspondence of the theoretical and experimental dependences, the values $P_k = f(x)$ of straight sections and pneumatic gear ratios are estimated.

Keywords: measurement, nozzle-receiving channel, transducer, static characteristic, circuit, experimental setup.

Vasyutenko Alexander Pavlovich - Sevastopol State University, Polytechnic Institute, Sevastopol, 33 Universitetskaya St.

Voloshina Natalya Aleksandrovna - Sevastopol State University, Polytechnic Institute, Sevastopol, 33 Universitetskaya st.

УДК 617.582

АНАТОМИЧЕСКИ АДАПТИРУЕМЫЙ РАНОРАСШИРИТЕЛЬ ДЛЯ МАЛОИНВАЗИВНОГО ВЕРТЕБРОЛОГИЧЕСКОГО ОПЕРАЦИОННОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА

Пашков Е.В.¹, Калинин М.И.²

***Аннотация.** Проанализированы функциональные возможности конструкций ранорасширителей ряда известных производителей медицинского оборудования, применяемых при малоинвазивных операциях на позвоночнике (вертебрология). Выявлены недостатки, сужающие их функциональные возможности и надежность работы. Обосновано применение размещаемых в ране сменных лопаток, снабженных серповидными окнами, увеличивающих площадь рабочей зоны, используемой для ввода в рану хирургического инструмента, а также улучшающих визуальность наблюдения за ходом вертебрологического операционного вмешательства. Приведено описание оригинальной конструкции ранорасширителя, снабжаемого различными по форме сменными лопаткам, показан способ его установки на хирургическом столе.*

***Ключевые слова.** Ранорасширитель, вертебрология, сменные лопатки, механизм поворота лопаток.*

Введение. При проведении малоинвазивных хирургических операций на позвоночнике весьма эффективно используются ранорасширители, позволяющие увеличить площадь рабочего пространства для размещения хирургического инструмента при минимальных размерах операционной раны, визуальность наблюдения за ходом хирургического вмешательства, а также снижающие утомляемость хирурга при их использовании в качестве жестких опор для инструмента [1, 2, 3].

Проведенный анализ известных конструкций ранорасширителей позволил выявить ряд общих присущих им недостатков, негативно отражающихся на их функциональных и технологических возможностях.

Ранорасширитель производителя медицинской техники «AESCULAP» [4], характеризующийся наличием раздвижной скобы с кронштейнами для закрепления сменных лопаток, устанавливается фактически на мышечных тканях и кожном покрытии человека в зоне раны, создает нагрузку на них, способен произвольно смещаться в ране, не обеспечивая заданного расположения относительно зон хирургического воздействия, имеет незначительную площадь рабочего пространства и ограниченную визуальность наблюдения за ходом операции.

Адаптируемый ранорасширитель фирмы «ABBOTT» [5], выполненный в виде кольца с закрепляемыми на нем сменными лопатками, конструктивно громоздок, оказывает значительную силовую нагрузку на ткани человеческого тела в зоне раны, вызывая их нежелательное деформирование, затрудняющее доступ хирургического инструмента к зонам хирургического воздействия, требует значительных временных затрат для индивидуальной настройки каждой лопатки.

Анатомически адаптируемый ранорасширитель производителя медицинской техники «STRYKER» [6], выполненный на базе двух полуколец со сменными лопатками, имеющими возможность поворота с помощью приводного механизма для изменения рабочего пространства, устанавливаемый либо непосредственно в ране, либо над раной при закреплении на хирургическом столе с помощью кронштейнов и гибкого рукава с изменяющейся жесткостью, имеет небольшую площадь рабочего пространства, недостаточную надежность закрепления лопаток, что может приводить к их «выщелкиванию» из ложементов полуколец и сложен в изготовлении.

Результаты. Разработанный и изготовленный в лаборатории биомеханики Севастопольского государственного университета анатомически адаптируемый ранорасширитель [7] включает в себя два полукольца 1 и 6 (**Рис.1,а**), установленных с возможностью поворота на осях 10, закрепленных с помощью колпачковых гаек 12 в пазах корпуса 16 (**Рис.1,д**), снабженного кронштейном 15 для прикрепления с помощью зажимов и гибкого рукава с изменяющейся жесткостью к хирургическому столу.

Концы 13 и 14 полуколец выполнены в виде вилок, в пазах которых размещен палец 31 механизма поворота полуколец, включающего ползун, образованный двумя пересекающимися под углом цилиндрами 21 и 29. Цилиндр 21 размещен в отверстии кронштейна 15 и имеет резьбовое отверстие для сопряжения с резьбовой частью штока 23, смонтированного в отверстии кронштейна с возможностью вращения и зафиксированного в осевом направлении с одной стороны втулкой 24 и стопорным пружинным кольцом 25, а с другой стороны упорным пояском в отверстии кронштейна (**Рис.1,в**). Цилиндр 29, размещенный в вырезе 33 корпуса 16 (**Рис.1,д**), имеет отверстие под палец 31 с прорезью 28 для штифта 27, запрессованного в стенки цилиндра 11, и резьбу для колпачковой гайки 26. Палец 31 нагружен в направлении вилок 13 и 14 полуколец 6 и 1 пружиной 30.

В нижней части ползуна выполнена предохранительная консоль 32, исключая повреждение тканей и кожного покрова пациентов от случайного контакта с вилками полуколец в процессе их поворота (раскрытие/закрытие ранорасширителя), а также являющаяся ограничителем перемещения ползуна в сторону вилок, что исключает повреждение лопаток 8 при их сведении.

Наружные концы 3 и 2 полуколец шарнирно соединены между собой с помощью пальца 4, запрессованного в конец 3 полукольца 1 и помещенного в паз вилки полукольца 6. Внутренние цилиндрические расточки полуколец снабжены грибовидными штифтами 7 и 5 и пластинчатыми фигурными пружинами 11 (**Рис.1,б,г**) для фиксации устанавливаемых в полукольца лопаток (**Рис.1,е,ж**), имеющих соответствующие вырезы 38.

Для упрощения процесса установки лопаток на полукольцах выполнены реборды 19. При сборке/разборке и настройке ранорасширителя палец 31 может быть выведен из контакта с вилками полуколец с помощью гайки 26, выполняющей роль вытяжной рукоятки.

Установка лопаток 17, имеющих цилиндрическую форму (**Рис.1,е**), или комбинированных 8, выполненных в виде двух соединенных между собой оболочек – цилиндрической 20 и конической 35 (**Рис.1,ж**), осуществляется путем их незначительного сжатия, надевания на центральный грибовидный штифт 7 с последующим вращательным движением против часовой стрелки до контакта со штифтом 5 и защелкиванием пружины 11 в фигурный вырез лопаток 36.

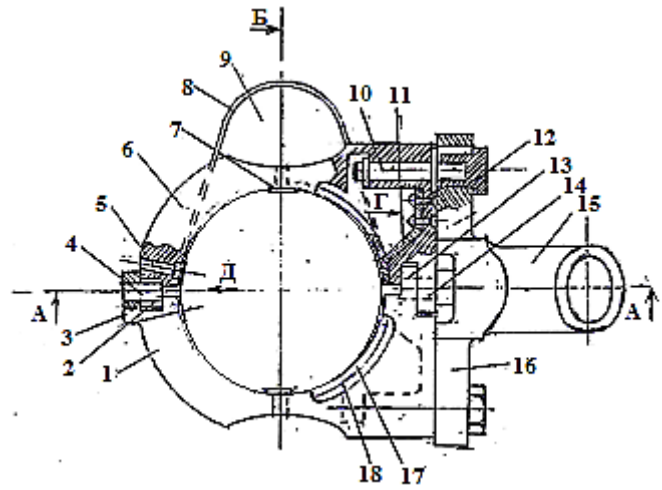
Для подвода в рану трубок для отсоса крови, подачи и отсоса физиологического раствора в лопатках предусмотрены окна 34, а в полукольцах - вырезы 18. Серповидное окно 9 комбинированной лопатки 8 увеличивает площадь рабочей зоны и используется для ввода хирургического инструмента в рану и визуального контроля за ходом операции.

Демонтаж (смена) лопаток производится в обратной последовательности. При этом используются вырезы 18 в полукольцах, через которые прямоугольной пластиной (толкателем) осуществляется упругое деформирование края лопатки в радиальном направлении для ее вывода из контакта с пружиной 11. Затем, вращательным движением по часовой стрелке, лопатка выводится из контакта со штифтами 5 и снимается со штифтов 7.

Раскрытие/закрытие ранорасширителя, т.е. разведение/сведение лопаток, осуществляется путем вращения резьбового штока 23 с помощью специального воротка, входящего в комплект ранорасширителя, что вызывает перемещение ползуна в отверстии 22 кронштейна 15, а следовательно и перемещение пальца 31, находящегося в контакте с вилками полуколец, и вызывающего их вращение вокруг осей 10. Смещение ползуна при выдвигании из отверстия 22 кронштейна 15 в сторону вилок полуколец компенсируется вхождением подпружиненного пальца 31 в отверстие цилиндрической части 29 ползуна.

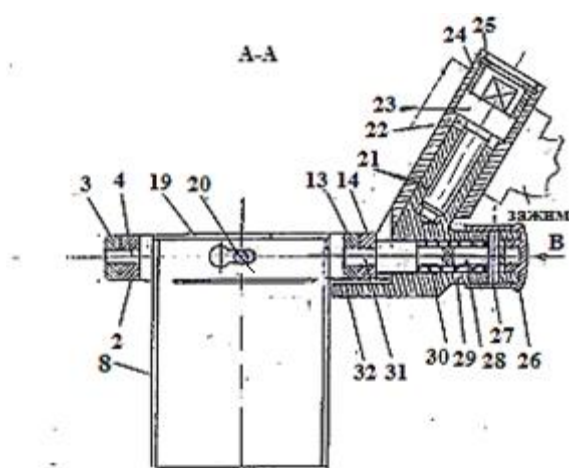


а)

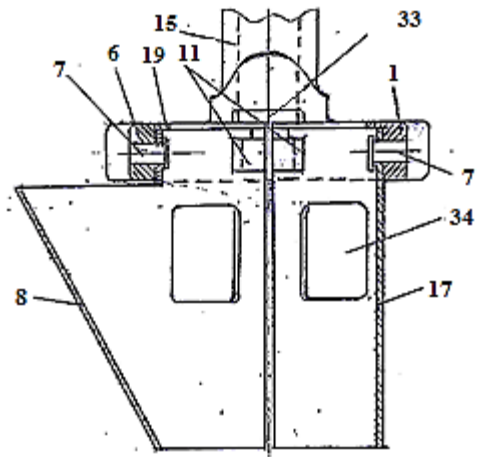


б)

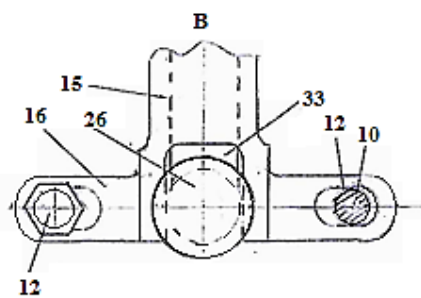
Б-Б



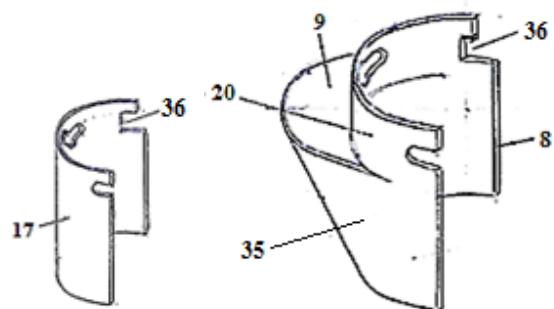
в)



г)



д)



е)

ж)

Рис.1 – Общий вид ранорасширителя (а), конструкция (б, в, г, д), форма сменных лопаток (е, ж)

Заключение. Использование грибовидных штифтов исключает соскальзывание с них лопаток под действием усилий, создаваемых хирургом в ходе операции, т.е. способствует повышению надежности ранорасширителя. Наличие у комбинированных лопаток серповидных окон, расположенных с внешней стороны, увеличивает площадь рабочей зоны, позволяет вводить в рану хирургический инструмент не только через центральное отверстие, образованное полукольцами, но и через них, что расширяет функциональные возможности и создает больше удобств для хирурга.

Повышается визуальность наблюдения за ходом выполнения операций, что особенно важно при лечении травм и заболеваний позвоночника, сопровождающихся установкой транспедикулярных систем различного назначения, установкой эндопротезов межпозвонковых дисков, при удалении грыжи, устранении защемления нервных корешков и др. Кроме того, при небольших по размеру ранах, что свойственно для малоинвазивных операций, можно использовать разные по форме лопатки, например, цилиндрическую или комбинированную.

Библиографический список

1. Мюллер М.Е.. Руководство по внутреннему остеосинтезу / М.Е. Мюллер и [др.] – М.: Изд. AD Marginem, 1996. – 754 с.
2. «SYNTHESE». MAIN CATALOGUE. AO ASIF. Original instruments and implants of the association for the study of internal fixation. 301 p.
3. «MATHYS MEDICAL LTD». CATALOGUE. <http://www.mathys.ru>.
4. «Aesculap». General Catalogue. AG & Co, KG 78532 Tuttlingen, Germany, [сайт]. URL: <http://www.aesculap.de>.
5. Abbott SpineDivision of Zimmer Biomet Holdings Inc.[сайт]. URL: <https://scrip.pharmaintelligence.informa.com/companies/199800053>
6. Stryker [сайт]. URL: <https://www.stryker.com/us/en/index.html>.
7. Патент UA №99075 Украина, МПК A61B 17/02, A61M 29/00, Спинальный анатомически адаптируемый ранорасширитель : опубл.10.07.2012, Бюл. №13 / Е.В. Пашков, М.И. Калинин, С.Л. Елисеев и др: – ил. – Текст : непосредственный.

Bibliograficheskiy spisok

1. Myuller M.E.. Rukovodstvo po vnutrennemu osteosintezu / M.E. Myuller i [dr.] – M.: Izd. AD Marginem, 1996. – 754 s.
2. «SYNTHESE». MAIN CATALOGUE. AO ASIF. Original instruments and implants of the association for the study of internal fixation. 301 p.
3. «MATHYS MEDICAL LTD». CATALOGUE. <http://www.mathys.ru>.
4. «Aesculap». General Catalogue. AG & Co, KG 78532 Tuttlingen, Germany, [sajt]. URL: <http://www.aesculap.de>.

5. Abbott SpineDivision of Zimmer Biomet Holdings Inc.[sajt]. URL: <https://scrip.pharmaintelligence.informa.com/companies/199800053>
6. Stryker [sajt]. URL: <https://www.stryker.com/us/en/index.html>.
7. Patent UA №99075 Ukraina, MPK A61V 17/02, A61M 29/00, Spinal'nyj anatomicheski adaptiruemyj ranorasshiritel' : opubl.10.07.2012, Byul. №13 / E.V. Pashkov, M.I. Kalinin, S.L. Eliseev i dr. – il. – Tekst : neposredstvennyj.

¹Пашков Евгений Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», pashkov@sevsu.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

²Калинин Михаил Иванович, к.т.н., доцент, руководитель группы НИЛ «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов», kalininsev@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет

ANDANATOMICAL ADAPTABLE RETRACTOR FOR MINIMALLY INVASIVE SURGERY VERTEBROLOGICAL

E.V. Pashkov, M.I. Kalinin

The functional capabilities of the designs of wound expanders of a number of well-known manufacturers of medical equipment used in minimally invasive spine operations (vertebrology) are analyzed. Disadvantages that reduce their functionality and reliability are identified. The use of removable blades placed in the wound, equipped with Crescent-shaped windows, increasing the area of the working area used for inserting a surgical instrument into the wound, as well as improving the visual observation of the course of vertebrological surgical intervention, is justified. The description of the original design of the wound expander, which is equipped with different shaped removable blades, is given, and the method of its installation on the surgical table is shown.

Keyword: the retractor, vertebrology, replaceable blades, the mechanism of rotation of the blades.

Pashkov Yevgeny Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Testing Systems and Automation of Technological Processes", pashkov@sevsu.ru, Russia, Sevastopol State University

Kalinin Mikhail Ivanovich, Ph. D., associate Professor, head of the NIL group "Experimental life support systems for biological objects", kalininsev@mail.ru, Russia, Sevastopol state University

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ МЕТОДОМ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Заморёнова Д.В.¹, Гутник С.А.², Заморёнов И.М.³

Аннотация: В связи с возрастающим количеством приборов, излучающих высокочастотные электромагнитные колебания, возникает проблема оценки воздействия на человека электромагнитного излучения сверхвысокой частоты. Рассматривается метод газоразрядной визуализации как способ оценки воздействия электромагнитного излучения сверхвысокой частоты на человека. Приведена схема экспериментальной установки. Проводятся эксперименты на двух добровольных испытуемых, и оценивается влияние электромагнитного излучения сверхвысокой частоты в каждом эксперименте. Проводится анализ полученных результатов. Результаты воздействия электромагнитного излучения сверхвысокой частоты на человека представлены в виде круговых диаграмм.

Ключевые слова: газоразрядная визуализация, плотность потока энергии, фигуры Лихтенберга

Использование электрических и электромагнитных устройств, быстрый рост числа телекоммуникационных систем, радиовещательных, радиопередающих и радарных установок увеличивают возможность воздействия электромагнитной энергии на человека и одновременно вызывают озабоченность возможным развитием неблагоприятных эффектов, связанных с этим воздействием. Воздействие на население микроволн, излучаемых искусственными источниками, в настоящее время во много раз превышает излучение, создаваемое естественными источниками. Быстрое увеличение их числа и существенное повышение уровней излучения привело к своего рода "электромагнитному загрязнению".

Важнейшие искусственные источники включают в себя радиолокационные установки, сеть радиовещательных и телевизионных передатчиков, базовые станции мобильной связи, мобильные телефоны и т.д. Возникает вопрос: как именно электромагнитные поля (ЭМП) СВЧ воздействуют на человека? Для этого была смоделирована ситуация, в которой человек, помещённый в электромагнитное поле сверхвысокой частоты, находился в нём определённое время, а затем производилась диагностика изменения его физического состояния. Диагностика производилась с помощью прибора "Корона-ТВ". Принцип работы этого прибора основан на методе газоразрядной визуализации [1].

Газоразрядная визуализация (или эффект Кирлиан) – это визуальное или приборное наблюдение свечения газового разряда, возникающего вблизи поверхности исследуемого объекта при помещении его в электрическое поле высокой напряжённости.

Газоразрядные изображения пальцев рук и ног человека позволяют судить об общем уровне и характере его физиологической активности, проводить классификацию состояния по типу свечения и следить за влиянием на организм различных воздействий. Эффект Кирлиан (**Рис.1**) привлёк внимание благодаря возможности улавливать тонкие изменения состояния физической ауры человека [2, 3].

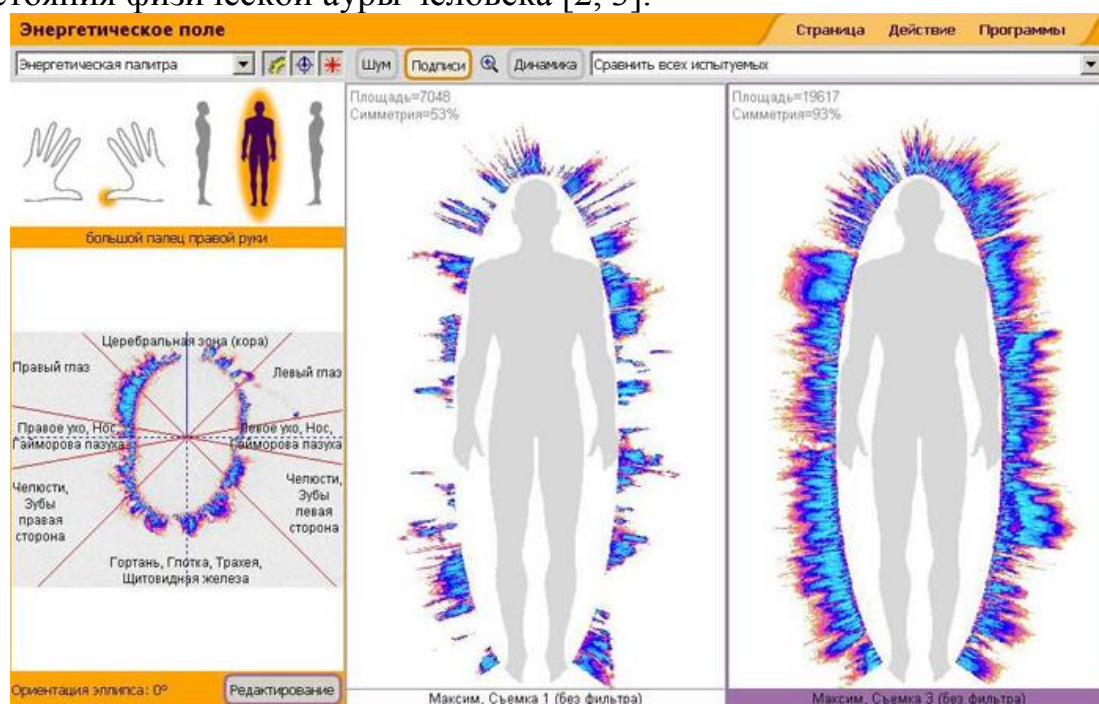


Рис.1 – Эффект Кирлиан

Физической аурой человека является вся совокупность физических полей и излучений, формируемых телом в пространстве за счёт собственной эмиссии и за счёт взаимодействия с процессами в окружающей среде. Физическая аура состоит из множества различных компонентов, каждый из которых отражает различные её стороны.

В то же время из физики известно, что ни одно из полей нельзя зарегистрировать непосредственно, а только по их действию на какие-то физические объекты и процессы. Для регистрации полей физической ауры человека необходимо найти процесс, чувствительный к максимальному количеству компонентов этой ауры. Таким процессом является газоразрядная визуализация.

Действительно, инициатором разряда при эффекте Кирлиан выступают заряженные частицы, его характеристики зависят от распределения электромагнитного поля, поверхностных и объёмных свойств объекта, а так же состава газовой среды вблизи поверхности. Но это

как раз те самые факторы, которые формируют физическую ауру человека. Для его реализации метода необходимо помещение исследуемого объекта в электрическое поле высокой напряжённости. Объект становится частью электрической цепи, при разряде через него протекает электрический ток. На **Рис.2** изображена принципиальная схема устройства для газоразрядной визуализации.

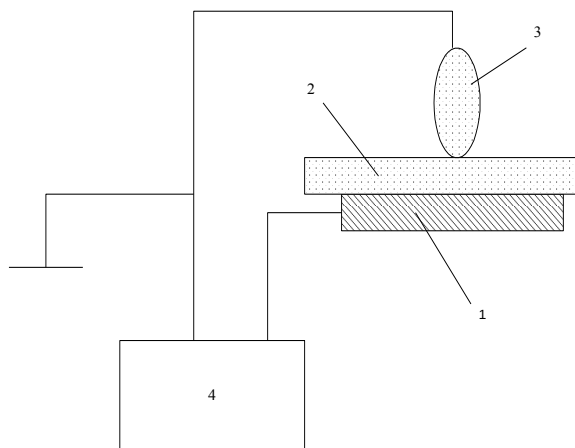


Рис.2 – Принципиальная схема устройства для ГРВ: 1 – электрод, 2 – диэлектрик, 3 – объект, 4 - генератор

В качестве электрода 1 может служить любая проводящая поверхность, например, слой металла, сеточка или токопроводящее покрытие на поверхности диэлектрика 2 (стекла). В качестве второго электрода выступает объект 3. После подачи напряжения от генератора и по мере увеличения амплитуды напряжения между электродами возрастает разность потенциалов, т. е. увеличивается напряжённость электрического поля. Возникает электрический ток.

Однако, при атмосферном давлении этот ток крайне мал, так как электроны успевают пройти очень короткое расстояние и поглощаются молекулами воздуха. При определённом напряжении, называемом пороговым, ток скачкообразно возрастает в сотни и даже тысячи раз; это происходит за счёт того, что энергия, набираемая электронами на длине свободного пробега оказывается достаточной для ионизации молекул воздуха одновременно с ионизацией происходит испускание квантов света – фотонов, поэтому разряд может быть зафиксирован оптическим путём: визуально на фотоматериале, фотодатчиком или телекамерой. Образующаяся фигура носит название «фигуры Лихтенберга», по имени открывшего её немецкого физика. Если амплитуду напряжения или давления газа постепенно увеличивать, то при определённых значениях от фигуры Лихтенберга развивается интенсивный яркий канал разряда – стример [4]. Это характеризует начало следующей – стримерной – стадии разряда, которая затем переходит в искровую. Для ГРВ используется лишь самая слабوتочная - лавинная стадия, при которой средний ток не превышает единиц микроампер.

Таким образом, можно сказать, что газовый разряд выступает как средство усиления и визуализации сверхслабых процессов, протекающих вблизи поверхности объекта. При ГРВ информация об объекте передаётся на изображение за счёт влияния объекта на характеристики разряда: интенсивность, длительность, частоту следования и пространственное распределение отдельных лавинных актов, а так же спектральный состав излучения. Информативными оказывается как измерение оптических характеристик свечения, так и измерение тока разряда.

Параметры, используемые в приборах серии «Корона», специально подобраны в результате длительных теоретических и экспериментальных исследований [5].

Стандартная модификация прибора имеет следующие параметры: амплитуда биполярных импульсов от 3 до 20 кВ с непрерывно-ступенчатой регулировкой; длительность импульсов 10 мс; частота следования импульсов до 1000 Гц; формирование пачки импульсов регулируемой длительности с автоматической экспозицией; компьютерный контроль всех параметров; установка времени экспозиции в диапазоне 0.128 ... 8388 мс; установка уровня управляющего импульса от min (единицы Вольт) до max (около 300 В); изменение частоты заполнения импульсного пакета (выбирается из дискретного ряда допустимых значений); запуск и остановка процесса съёмки; программное управление питанием прибора, и соответственно возможность программного включения/выключения устройства; возможность запоминания прибором всех текущих установок; кварцевая стабилизация всех параметров с точностью не хуже 1%.

Облучение человека проводилось с помощью аппарата «Луч-2». Аппарат представляет собой магнетронный генератор, создающий электромагнитные колебания СВЧ дециметрового диапазона (12,6 см). Номинальное значение фиксированной частоты электромагнитных колебаний 2375 МГц, выходная мощность электромагнитных колебаний, подводимая к излучателям, регулируется семью ступенями: 2,5, 5, 7, 10, 13, 16 и 20 Вт. Диаметр излучателя выбран 115 мм.

Оценку интенсивности воздействия ЭМП сверхвысокой частоты на человека, при дистанционном облучении в эксперименте, проводят по интенсивности облучения, выражаемой в величинах «плотности потока энергии» в мкВт/см².

Для измерения плотности потока энергии использовался прибор ПЗ-19, построенный по принципу преобразования энергии ЭМП в постоянный ток (при помощи термистора), величина которого и служит мерой интенсивности [2].

На **Рис.3** изображена схема экспериментальной установки.

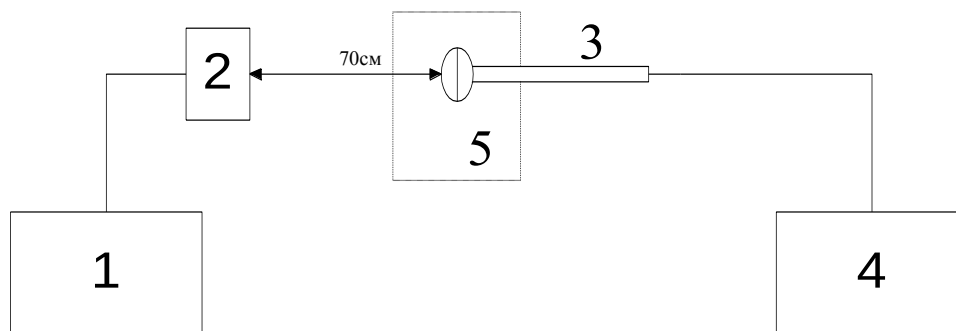


Рис.3 – Схема экспериментальной установки: 1 – “Луч – 2”;
2 – излучатель; 3 – антенна; 4 – прибор ПЗ-19;
5 – зона расположения испытуемого

Было проведено два эксперимента: условия первого эксперимента – мощность излучателя 7 Вт; время облучения 5 минут; при этом величина ППЭ составила 39.05 мкВт/см²; условия второго эксперимента – мощность излучателя 10 Вт; время облучения 10 минут; при этом величина ППЭ составила 401.1 мкВт/см²;

Физические состояния испытуемых до облучения и их состояние после облучения показаны на **Рис.4-7**.

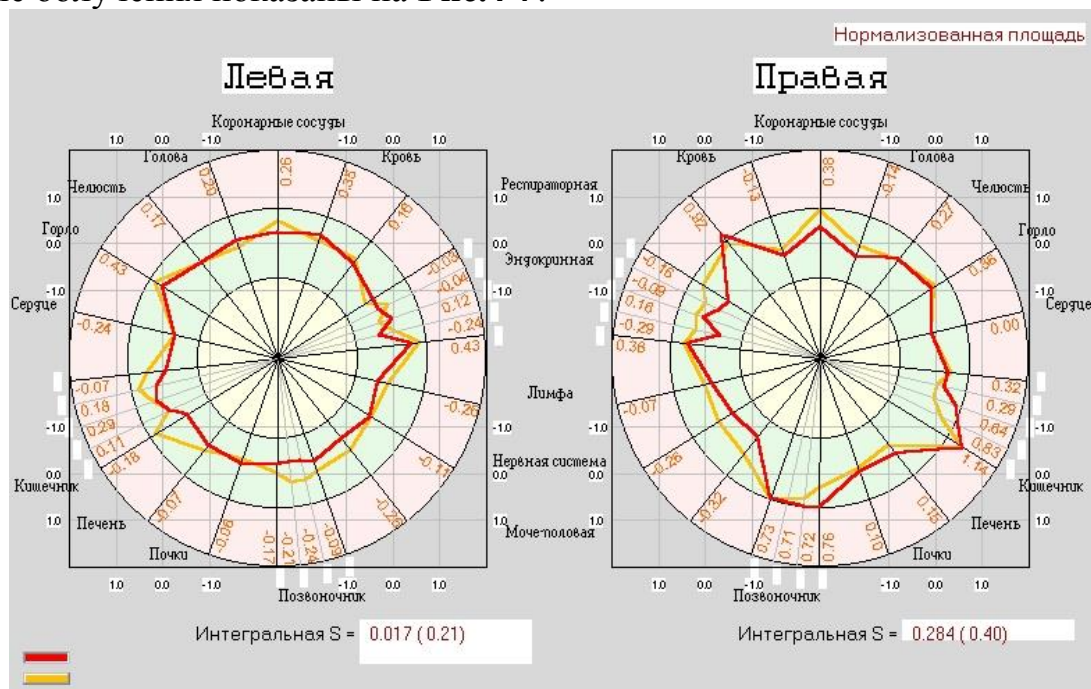


Рис.4 – Диаграммы состояния 1-го испытуемого до облучения

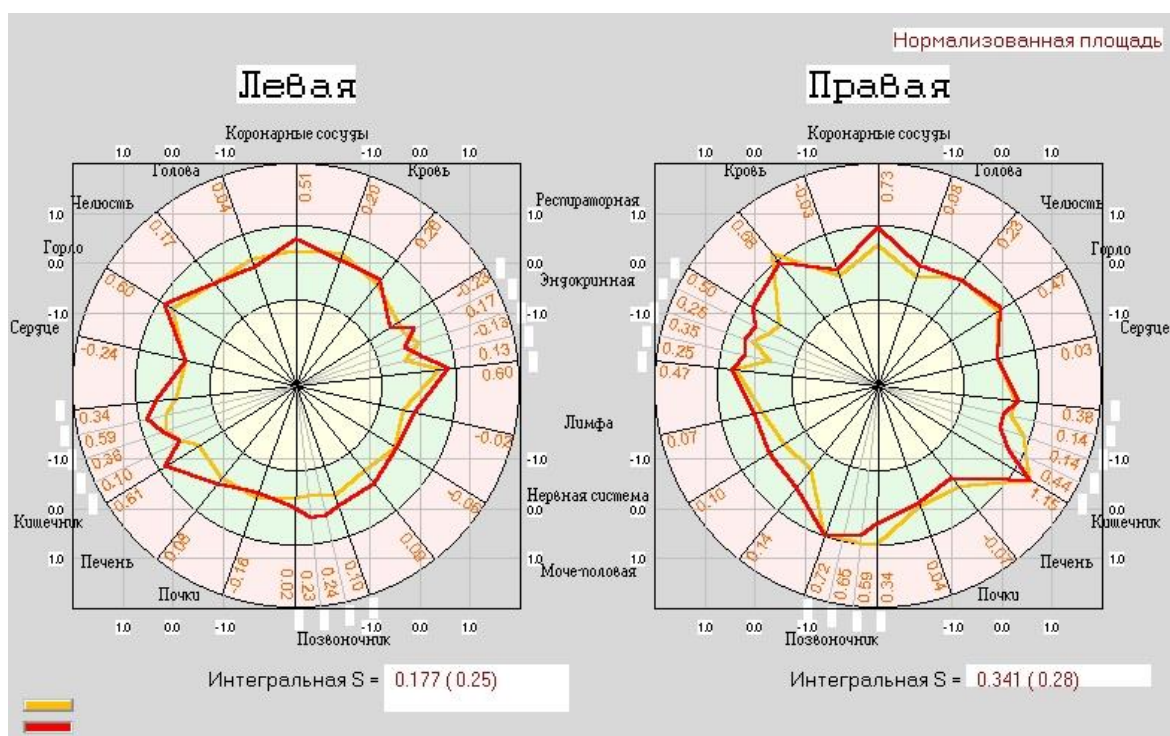


Рис.5 – Диаграммы состояния 1-го испытуемого после облучения

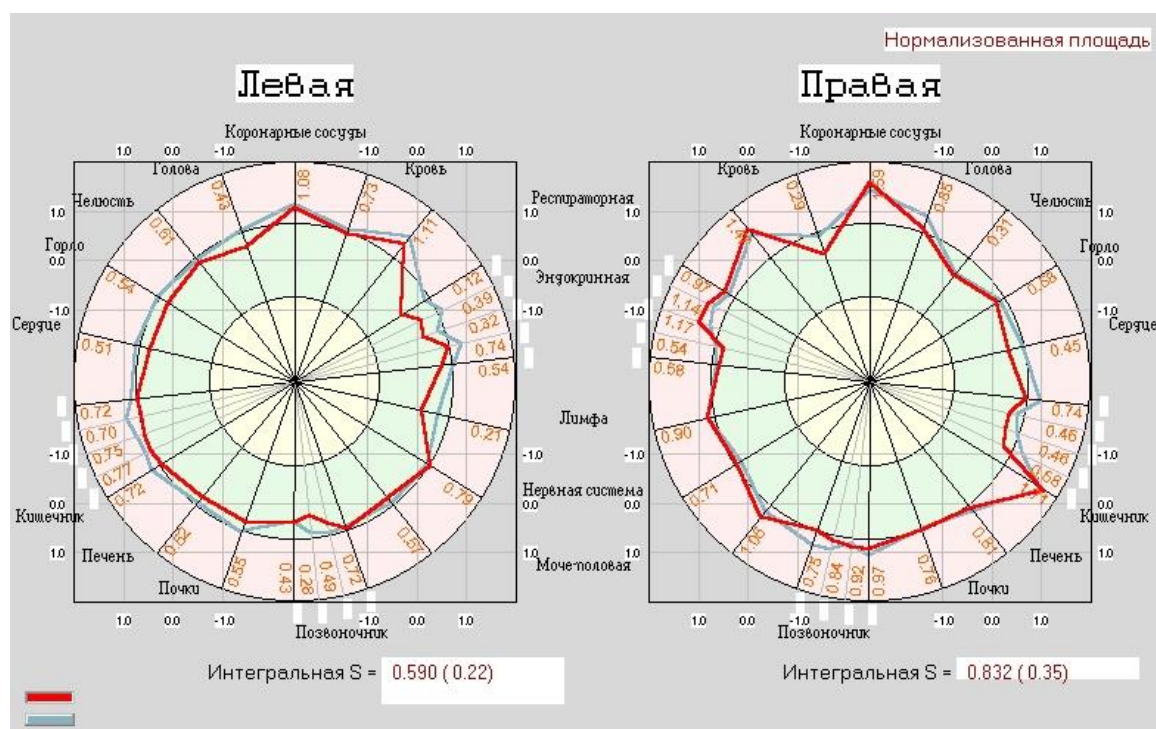


Рис.6 – Диаграммы состояния 2-го испытуемого до облучения

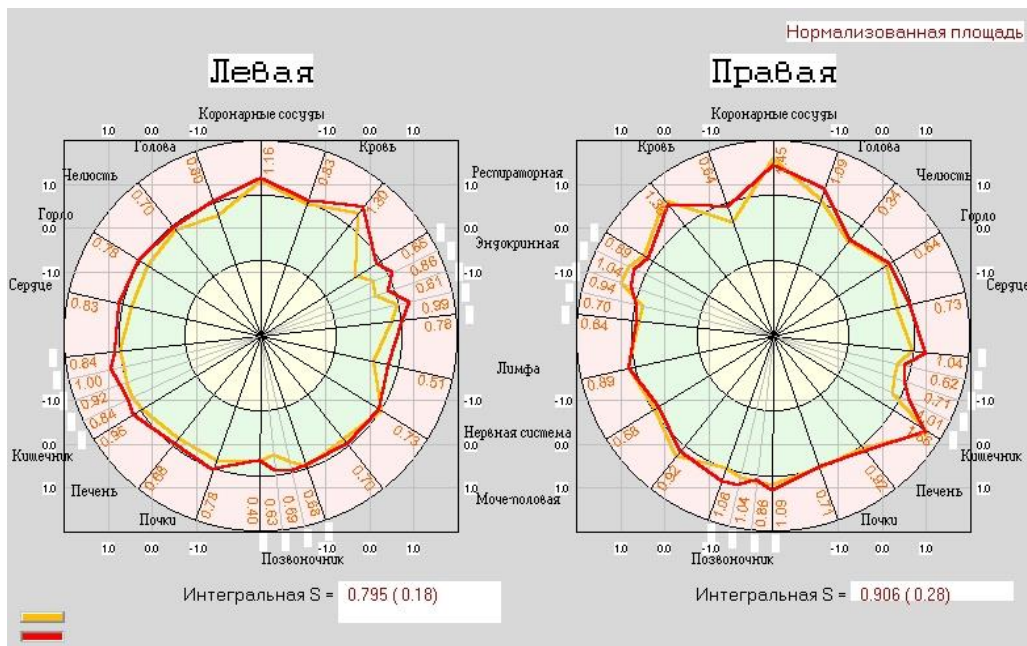


Рис.7 – Диаграммы состояния 2-го испытуемого после облучения

При сравнении диаграмм (Рис.4-7) видно, что увеличилась интегральная площадь: $S^1_{\text{левая}} = 0,017$ и $S^1_{\text{правая}} = 0,284$, а $S^2_{\text{левая}} = 0,177$ и $S^2_{\text{правая}} = 0,341$. Аналогично, при сравнении диаграмм на рисунках 5,6 видно, что интегральные площади $S^1_{\text{левая}} = 0,590$ и $S^1_{\text{правая}} = 0,832$ меньше чем, $S^2_{\text{левая}} = 0,795$ и $S^2_{\text{правая}} = 0,906$. Таким образом, изменения диаграммы состояния испытуемого свидетельствует об изменении его физического состояния после облучения. В результате анализа полученных данных можно сделать следующие выводы: при воздействия электромагнитного излучения сверхвысокой частоты на человека наблюдается отклонение его физического состояния от первоначального; описанный метод и экспериментальная установка могут быть использованы для оценки воздействия СВЧ-излучения на человека и разработка рекомендаций на поведение человека в условиях электромагнитного излучения сверхвысокой частоты.

Библиографический список

1. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии/ А.Г. Коротков – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001. - 360 с.
2. Баньковский Н.Г. Изучение физики газоразрядной визуализации / Н.Г. Баньковский, К.Г. Коротков // Письма ЖТФ. 1982. Т.8, №4. С. 216-300.
3. Адаменко, В.Г. Исследование механизма формирования изображений, получаемых с помощью высокочастотного электрического разряда. [Текст]: дисс. канд. физ-мат. наук / Адаменко Виктор Григорьевич. – Минск, 1975. 140с.

4. Шандала М.Г. Санитарный надзор за источниками электромагнитных излучений в окружающей среде/ М. Г. Шандала, Ю.Д. Думанский, Д.С. Иванов – К.: Здоровье, 1990. – 52 с.
5. Баньковский Н.Г. Физические процессы формирования изображения при газоразрядной визуализации (эффект Кириллиан) / Н.Г. Баньковский, К.Г. Коротков, Н.Н. Петров // Радиотехника и электроника. 1986. Т.31, №4. С. 625-642.
6. Грибковский В. Професар електрографії і магнетизму / В. Грибковский, В. Гапоненко, В. Киселев. – Навука і техніка. М., 1988. 187 с.
7. Konikewich L.W. Bioelectrography. A New Method for Detecting Cancer / L.W. Konikewich, L.C. Griff. – Leonard Associates Press. 1984. 240p.

Bibliograficheskij spisok

1. Korotkov K.G. Osnovy GRV bioelektrografii/ A.G. Korotkov – SPb: SPbGITMO (TU), 2001. - 360 s.
2. Ban'kovskij N.G. Izuchenie fiziki gazorazradnoj vizualizacii / N.G. Ban'kovskij, K.G. Korotkov // Pis'ma ZHTF. 1982. T.8, №4. S. 216-300.
3. Adamenko, V.G. Issledovanie mekhanizma formirovaniya izobrazhenij, poluchaemyh s pomoshch'yu vysokochastotnogo elektricheskogo razryada. [Tekst]: diss. kand. fiz-mat. nauk / Adamenko Viktor Grigor'evich. – Minsk, 1975. 140s.
4. SHandala M.G. Sanitarnyj nadzor za istochnikami elektromagnitnyh izluchenij v okruzhayushchej srede/ M. G. SHandala, YU.D. Dumanskij, D.S. Ivanov – K.: Zdorov'e, 1990. – 52 s.
5. Ban'kovskij N.G. Fizicheskie processy formirovaniya izobrazheniya pri gazorazryadnoj vizualizacii (effekt Kiirlian) / N.G. Ban'kovskij, K.G. Korotkov, N.N. Petrov // Radiotekhnika i elektronika. 1986. T.31, №4. S. 625-642.
6. Gribkovskij V. Profesar elektrografii i magnetyzmu / V. Gribkovskij, V. Gaponenko, V. Kiselev. – Navuka i tekhnika. M., 1988. 187 s.
7. Konikewich L.W. Bioelectrography. A New Method for Detecting Cancer / L.W. Konikewich, L.C. Griff. – Leonard Associates Press. 1984. 240p.

¹*Заморёнова Дарья Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборные системы и автоматизация технологических процессов», Севастопольский государственный университет, DVZamorenova@sevsu.ru, 299053, Россия, Севастополь, ул. Университетская, 33*

²*Гутник Сергей Андреевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Севастопольский государственный университет, DVZamorenova@sevsu.ru, 299053, Россия, Севастополь, ул. Университетская, 33*

³Заморёнов Илья Михайлович, студент, ilia.zamoryonov@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33

EVALUATION OF HUMAN INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ULTRA HIGH FREQUENCY BY THE METHOD OF DISCHARGE VISUALIZATION

D.V. Zamoryonova, S.A. Gutnik, I.M. Zamoryonov

In connection with the increasing number of devices emitting high-frequency electromagnetic waves, the problem of assessing the human exposure to ultra-high frequency electromagnetic radiation arises. The gas-discharge visualization method is considered as a way of assessing the effect of ultra-high frequency electromagnetic radiation on a person. The experimental setup is shown. Experiments are conducted on two subjects, and the effect of ultrahigh-frequency electromagnetic radiation in each experiment is evaluated. The analysis of the results is carried out. The results of exposure to ultra-high frequency electromagnetic radiation on humans are presented in the form of pie charts.

Keywords: gas discharge visualization, energy flux density, Lichtenberg figures

Zamoryonova Darya Viktorovna, Candidate of technical Sciences, associate Professor of “Instrument systems and automation of technological processes”, Sevastopol State University, DVZamorenova@sevsu.ru, 299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str., 33

Gutnik Sergey Andreevich, Candidate of technical Sciences, associate Professor of “Technosphere security”, Sevastopol State University, DVZamorenova@sevsu.ru, 299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str., 33

Ilya Zamoryonov, student, ilia.zamoryonov@gmail.com, Sevastopol, Sevastopol State University, Russia

ФОРМИРОВАНИЕ КАРТЫ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЕГЕТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЁТКОГО АНАЛИЗА

Салманов Ф.М.

***Аннотация.** Предлагаются два нечётких подхода к количественной оценке фотосинтетически активной биомассы с целью формирования карты оценки интенсивности растительности и/или распознавания других объектов при отсутствии вегетации. Для идентификации функции расчёта вегетационного индекса используется нечётко-множественный анализ отражений в красном и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра.*

***Ключевые слова.** Вегетационный индекс, мультиспектральное отражение объектов, нечёткое множество, функция принадлежности, нечёткий вывод.*

Введение. Мультиспектральная отражательная способность растительности, характеризуемая существенными различиями в отражении излучения разных длин волн (от 400 нм до 2400 нм), является характерным оценочным признаком интенсивности вегетации и её состояния. Мультиспектральная визуализация поверхности земли обеспечивает сбор данных как в видимой, так и в невидимой полосах света, что позволяет генерировать составные цветовые изображения, а также индексы вегетации. Накопленные знания о причинно-следственных связях между структурой и состоянием вегетации и её спектрально отражательными способностями по предсказуемой схеме в цветовом спектре позволили использовать аэрокосмические снимки для картографирования и идентификации типов растительности и их стрессового состояния. Это, несомненно, имеет огромное прикладное значение в области точного земледелия и экономического планирования в аграрном секторе, или, более конкретно, для оценки состояния сельскохозяйственных культур и, соответственно, прогнозирования их урожайности.

Для работы с мультиспектральной информацией, полученной путём дистанционного зондирования поверхности земли, обычно прибегают к созданию так называемых «индексных» изображений, которые могут быть собраны с разрешением, измеряемым в дюймах на пиксель. Путём комбинации значений яркости в определенных диапазонах, информативных для распознавания растительности, и последующего вычисления по этим значениям «вегетационного индекса» формируется изображение, соответствующее значению данного индекса в каждом пикселе. Это позволяет распознать интенсивность растительности и/или оценить её текущее состояние [1].

Вегетационные индексы вычисляются путём выполнения операций с разными спектральными диапазонами данных дистанционного зондирования и отражают те или иные параметры растительности в данном пикселе снимка.

При этом, существующие вегетационные индексы сформированы экспериментальным путём с учётом особенностей отражения той или иной растительности. В настоящее время известны около 160 видов вегетационных индексов, подобранных эмпирически на основе известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. В мультиспектральной визуализации используются камеры с узкополосными фильтрами для оптимального определения отражательной способности вегетаций, предоставляя информацию, необходимую для оценки их текущего состояния (Рис.1).

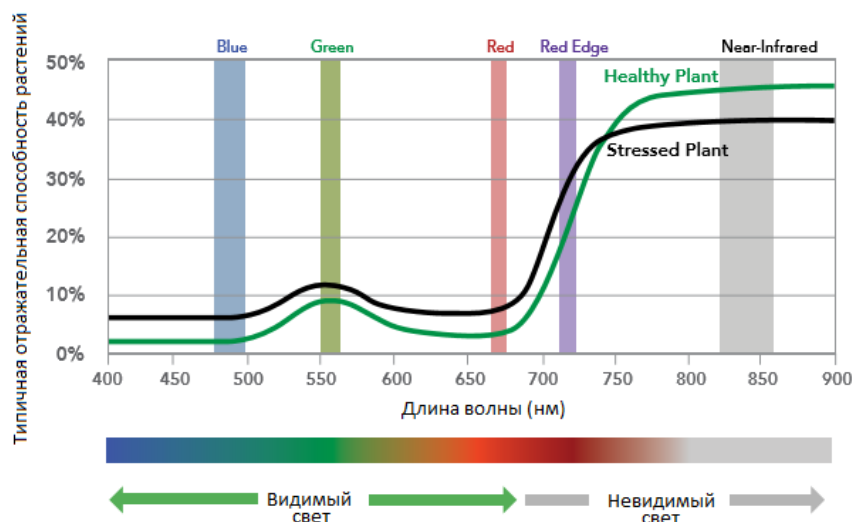


Рис.1 – Спектральная отражательная способность растений

Постановка задачи. Существующие подходы к вычислениям вегетационных индексов, как правило, базируются на двух независимых участках спектра кривой, представленной на рис. 1, а именно: на отражение в красной области спектра RED, куда приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений; и на отражение в ближней инфракрасной области спектра NIR (750÷900 нм), где сосредоточена область максимального отражения клеточных структур листа. Наиболее распространённым вегетационным индексом, применяемым для решения задач, связанных с оценками растительного покрова, является нормализованный относительный индекс растительности (*NDVI* – Normalized Difference Vegetation Index), который вычисляется по формуле

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (3)$$

где *RED* – отражение в красной области спектра, *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра. Значения индекса *NDVI* варьируется от 0 до 1: чем выше его значение, тем интенсивность растительности выше, и наоборот, чем ниже значение индекса, тем растительность разрежённая, а стремление к нулю вообще указывает на открытую почву.

Отражения вегетаций в областях спектра оцениваются в процентах, т.е. как показано на рис. 1, или в десятичных единицах, что, собственно, одно и то же.

При этом, диапазон отражения областей спектра, как правило, не превышает 50% или 0.5 единиц. Однако, в реальных ситуациях данные отражений областей спектра необходимо рассматривать как слабо структурированные, т.е. такими, о которых известна их принадлежность к определённому типу. В частности, значения *RED* и *NIR* определяют уровни отражений в красной и инфракрасной областях, которые в разных источниках оцениваются разными диапазонами, например, в виде 620÷750 нм, 550÷750 нм или 600÷700 для красной и в виде 750÷1300 нм, 750÷1000 нм или 700÷1000 для ближней инфракрасной области спектра. Это и не удивительно, так как красная и ближняя инфракрасная области не имеют чёткие, явно выраженные границы. По сути, они представляют собой размытые множества (или множества с размытыми границами), т.е. слабо структурированные области, которые целесообразно описывать в виде нечётких подмножеств универсума, охватывающий диапазон значений длин волн спектра, например, от 400 до 900 нм, не учитывая длины волн в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах спектра. Поэтому отражения лучше задавать интервально $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$ или в виде вербального утверждения типа «близко к 0.35», т.е. в виде нечёткого множества. Исходя из этой парадигмы, необходимо сформулировать соответствующие алгоритмы для генерации карты интенсивности вегетации с применением нечётко-множественного анализа данных, полученных с мультиспектральных датчиков по результатам дистанционного зондирования растительности.

Оценка состояния растительности с применением нечётко-множественного анализа данных. В [3] для отображения поверхности земли приведена стандартизированная непрерывная градиентная шкала значений индекса *NDVI* в диапазоне от -1 до +1 (таблица 1).

Таблица 1. – Отображения индекса *NDVI*

Тип объекта	<i>RED</i>	<i>NIR</i>	<i>NDVI</i>	<i>NDVI</i> ^{def}
Густая вегетация	0.100	0.50	0.700	0.6674
Разряжённая вегетация	0.100	0.30	0.500	0.5013
Открытая почва	0.250	0.30	0.025	0.0910
Облака	0.250	0.25	0.000	0.0000
Снег и/или лёд	0.375	0.35	-0.050	-0.0345
Вода	0.020	0.01	-0.250	-0.3349
Рукотворные материалы	0.300	0.10	-0.500	-0.4921

Благодаря особенностям отражения в красном и близкой к инфракрасной областях электромагнитного спектра, природные и рукотворные (не связанные с вегетацией) объекты имеют фиксированные значения *NDVI*, чего не скажешь про территории, покрытые растительностью. Согласно выше приведённым соображениям, величины *RED*- и *NIR*-отражения растительности целесообразно считать слабо структурированными и, поэтому, их лучше всего отражать нечёткими множествами, т.е. фаззифицировать. Например, в случае густой растительности, по средствам простых нечётких множеств: $RED = \{0.1/0.075;$

1/0.1; 0.1/0.125} и $NIR=\{0.1/0.475; 1/0.5; 0.1/0.525\}$, описывающих оценочные понятия (термы) «*RED* близко к 0.1» и «*NIR* близко к 0.5», соответственно.

Вычисление $NDVI$ посредством (1) на α -уровнях: 0.1 (слева), 1, 0.1 (справа), дало следующие результаты:

- $\alpha_1=0.1$ (слева), $NDVI_{\alpha_1}=(0.475-0.075)/(0.475+0.075)=0.7273$;
- $\alpha_2=1$, $NDVI_{\alpha_2}=(0.5-0.1)/(0.5+0.1)=0.6667$;
- $\alpha_3=0.1$ (справа), $NDVI_{\alpha_3}=(0.525-0.125)/(0.525+0.125)=0.6154$.

В этом случае, решением будет нечёткое множество:

$$NDVI_F = NDVI_{\alpha_1} \cup NDVI_{\alpha_2} \cup NDVI_{\alpha_3} = \{0.1/0.7273; 1/0.6667; 0.1/0.6154\}.$$

Применяя формулу $NDVI^{\text{def}} = [\sum_{i=1}^3 NDVI_{\alpha_i} \alpha_i] / [\sum_{i=1}^3 \alpha_i]$, получим дефазифицированное значение $NDVI^{\text{def}}=0.6674$. Тогда искомое значение $NDVI$ лежит в интервале $[NDVI^{\text{def}}, NDVI]=[0.6674, 0.7]$. Рассчитанный по формуле (1) индекс $NDVI=0.7$ (см. таблицу 1) является округлённым значением. Поэтому, нечёткое множество $NDVI_F$, треугольная функция принадлежности которого представлена на **Рис.2**, более адекватно отражает густую растительность.

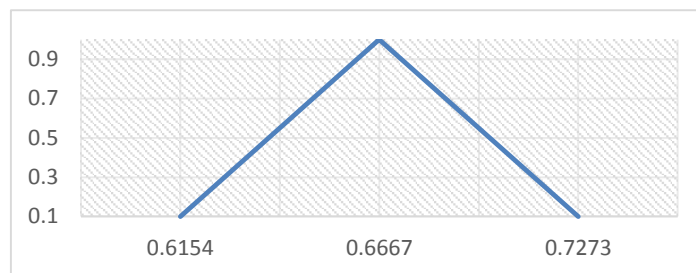


Рис.2 – Функция принадлежности нечёткого множества $NDVI_F$

По остальным объектам полученные дефазифицированные значения соответствующих индексов $NDVI$ также сведены в **таблице 1**.

Оценка состояния растительности с применением системы нечёткого вывода. Руководствуясь дискретной шкалой градации объектов, представленной в таблице 1, выберем за основу следующие суждения:

e_1 : «Если отражение в красной области спектра слабое и отражение в ближней инфракрасной области спектра сильное, то вегетационный индекс высокий»;

e_2 : «Если отражение в красной области спектра слабое и отражение в ближней инфракрасной области спектра среднее, то вегетационный индекс средний»;

e_3 : «Если отражение в красной области спектра ниже среднего и отражение в ближней инфракрасной области спектра среднее, то вегетационный индекс низкий»;

e_4 : «Если отражение в красной области спектра ниже среднего и отражение в ближней инфракрасной области спектра ниже среднего, то вегетационный индекс низкий»;

e_5 : «Если отражение в красной области спектра выше среднего и отражение в ближней инфракрасной области спектра среднее, то вегетационный индекс более чем низкий»;

e_6 : «Если отражение в красной области спектра чересчур слабое и отражение в ближней инфракрасной области спектра чересчур слабое, то вегетационный индекс очень низкий»;

e_7 : «Если отражение в красной области спектра среднее и отражение в ближней инфракрасной области спектра слабое, то вегетационный индекс чересчур низкий».

Анализ информационных фрагментов $e_1 \div e_7$, в виде причинно-следственных связей между уровнями отражений объектов в красной и ближней инфракрасной областях, с одной стороны, и, собственно, типами этих объектов, с другой, позволяет сформировать полный набор лингвистических переменных и правил для построения системы нечёткого вывода. Для удобства все лингвистические переменные сведены в **таблице 2**.

Таблица 2. – Переменные системы нечёткого вывода

Входы	x_1	Имя переменной	Отражение в красной области
		Терм множество	{ЧЕРЕСЧУР СЛАБОЕ, СЛАБОЕ, НИЖЕ СРЕДНЕГО, СРЕДНЕЕ, ВЫШЕ СРЕДНЕГО, СИЛЬНОЕ}
		Универсум	[0, 0.5]
	x_2	Имя переменной	Отражение в инфракрасной области
		Терм множество	{ЧЕРЕСЧУР СЛАБОЕ, СЛАБОЕ, НИЖЕ СРЕДНЕГО, СРЕДНЕЕ, ВЫШЕ СРЕДНЕГО, СИЛЬНОЕ}
		Универсум	[0, 0.5]
Выход (y)		Имя переменной	Вегетационный индекс
		Терм множество	{ЧЕРЕСЧУР НИЗКИЙ, ОЧЕНЬ НИЗКИЙ, БОЛЕЕ ЧЕМ НИЗКИЙ, НИЗКИЙ, СРЕДНИЙ, ВЫСОКИЙ}
		Универсум	[-1, 1]

Система правил в символьной форме будет иметь следующий вид:

e_1 : (x_1 =СЛАБОЕ) & (x_2 =СИЛЬНОЕ) $\Rightarrow$ (y =ВЫСОКИЙ);

e_2 : (x_1 =СЛАБОЕ) & (x_2 =СРЕДНЕЕ) $\Rightarrow$ (y =СРЕДНИЙ);

e_3 : (x_1 =НИЖЕ СРЕДНЕГО) & (x_2 =СРЕДНЕЕ) $\Rightarrow$ (y =НИЗКИЙ);

e_4 : (x_1 =НИЖЕ СРЕДНЕГО) & (x_2 =НИЖЕ СРЕДНЕГО) $\Rightarrow$ (y =НИЗКИЙ);

e_5 : (x_1 =ВЫШЕ СРЕДНЕГО) & (x_2 =СРЕДНЕЕ) $\Rightarrow$ (y =БОЛЕЕ ЧЕМ НИЗКИЙ);

e_6 : (x_1 =ЧЕРЕСЧУР СЛАБОЕ) & (x_2 =ЧЕРЕСЧУР СЛАБОЕ) $\Rightarrow$ (y =ОЧЕНЬ НИЗКИЙ);

e_7 : (x_1 =СРЕДНЕЕ) & (x_2 =СЛАБОЕ) $\Rightarrow$ (y =ЧЕРЕСЧУР НИЗКИЙ).

Для окончательного формирования системы нечёткого вывода необходимо отобразить введенные термы лингвистических переменных на множество соответствующих им действительных чисел (универсум) путём задания функций принадлежности. В качестве общей конструкции для функций принадлежности нечётких множеств, описывающих термы входных и выходной лингвистических переменных, выберем Гауссовскую функцию

$$\mu(u) = \exp[-(u - u_0)^2 / \sigma^2] \quad (2)$$

где u – элементы соответствующего универсума; u_0 – центр; σ^2 – плотность. Так, в редакторе MATLAB\Fuzzy Inference System функции принадлежности для термов входных и выходной лингвистических переменных генерированы в соответствии с (2) так, как это показано на **Рис.3** и **Рис.4**, соответственно.

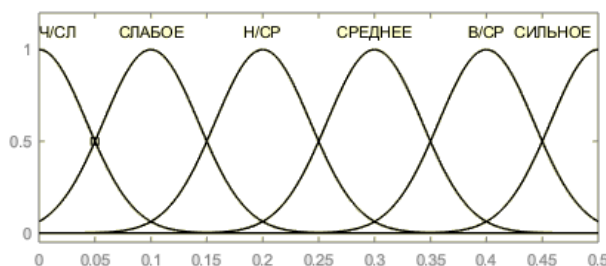


Рис.3 – Функции принадлежности входов

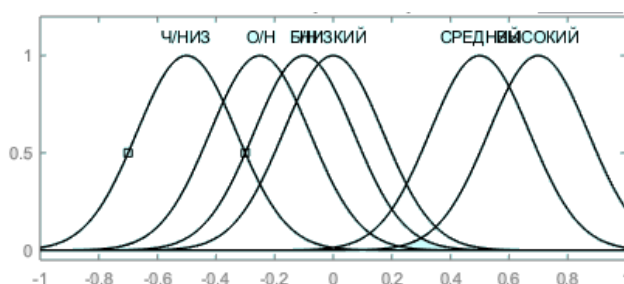


Рис.4 – Функции принадлежности выходов

После задания всех переменных, функций принадлежности и правил нечёткой базы знаний можно приступить к анализу работы построенной системы. Для этого удобно воспользоваться графической интерпретацией в нотации MATLAB в виде поверхностей принадлежности, приведенных на **Рис.5**.

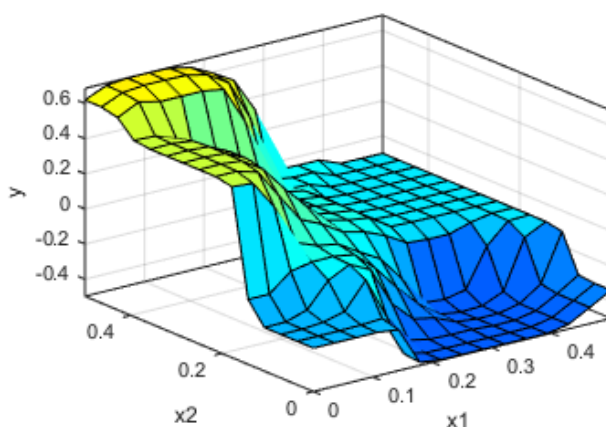
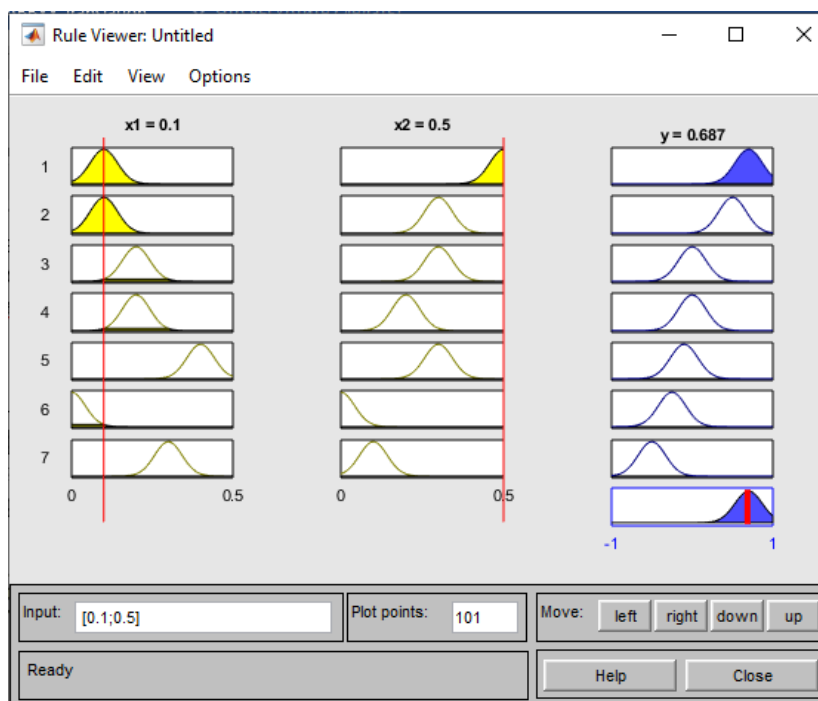


Рис.5 – Зависимость индекса IDVI от RED и NIR

Хорошо видно, что количественный показатель фотосинтетически активной биомассы не превышает значения 0.7, уменьшается с ростом отражения ближней инфракрасной области спектра и резко падает при увеличении отражения красной области спектра. В частности, после реализации правил $e_1 \div e_7$, редактор MATLAB\FIS типа Мамдани формирует интерактивное окно (**Рис.6**), отражающее нечёткую модель IDVI. Например, при входах RED=0.1 и NIR=0.5 редактор генерирует индекс IDVI со значением 0.687.

Рис.6 – Нечёткая модель *IDVI*

Заключение. В таблице 3 представлены результаты формирования индекса *NDVI* с применением нечётко-множественного анализа отражений в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра.

Таблица 3. – Результаты оптимизации

Тип объекта	Количественная оценка фотосинтетически активной биомассы с применением:		
	формулы (1)	нечётко-множественного анализа	системы нечёткого вывода
Густая вегетация	0.6667	0.6674	0.6870
Разряжённая вегетация	0.5000	0.5013	0.4500
Открытая почва	0.0909	0.0910	0.0015
Облака	0.0000	0.0000	0.0000
Снег и/или лёд	-0.0345	-0.0345	-0.0999
Вода	-0.3333	-0.3349	-0.2500
Рукотворные материалы	-0.5000	-0.4921	-0.4500

Как видно из таблицы 3, значения вегетационного индекса, полученные с применением двух предложенных нечётких подходов, в некоторых случаях заметно, а в остальных – в долях единицы отличаются от соответствующих значений *NDVI*, рассчитанных по формуле (1). Тем не менее, в отличие от формулы (1), которая сформирована эмпирическим путём, предлагаемые нечёткие модели вегетационного индекса являются более обоснованными, хоть

и построены на основе дискретной шкалы градации уровня интенсивности вегетации и других объектов в условиях её отсутствия.

В заключении следует отметить, что предлагаемые подходы имеют существенный ресурс для улучшения адекватности решения поставленной задачи, в первую очередь, в части оптимизации функций принадлежности в обоих нечётких подходах. В частности, подход к количественной оценке фотосинтетически активной биомассы с применением нечётко-множественного анализа может быть существенно улучшен за счёт введения качественного критерия оценки с его более адекватной нечёткой интерпретацией. Количественная оценка фотосинтетически активной биомассы с применением нечёткого вывода подразумевает аппроксимацию вегетационного индекса, а это, согласно [4, 5], возможно по средствам структурной и параметрической оптимизации лингвистических правил.

Библиографический список

1. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование. [сайт] URL: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news (дата обращения 11.03.2020).
2. Лупян, Е. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е.А. Лупян и [др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 263–284.
3. Abdelrahim, E. Monitoring and Yield Estimation of Sugarcane Using Remote Sensing and IS / E. Abdelrahim, A. Abdelaziem // American J. Engineering Research. – 2018. – V. 7. – №1. – P. 170–179.
4. Официальный сайт компании MicaSense. [сайт]. URL: <https://micasense.squarespace.com/atlasflight> (дата обращения 11.03.2020).
5. NDVI – теория и практика. [сайт]. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения 13.03.2020).
6. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators / B. Kosko // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. – 1992. P. 1153–1162.
7. Круглов В.В. Сравнение алгоритмов Мамдани и Сугэно в задаче аппроксимации функции / В.В. Круглов // Математическая морфология: электронный математический и медико-биологический журнал. – 2001. – Т. 3. – №4. – С. 69–76.

Bibliograficheskiy spisok

1. Vegetacionnye indeksy. Osnovy, formuly, prakticheskoe ispol'zovanie. [sajt] URL: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news (data obrashcheniya 11.03.2020).
2. Lupyan, E. A. Centr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arhivacii, obrabotki i analiza sputnikovyyh dannyyh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchej sredy / E.A. Lupyan i [dr.] // Sovremennyye problemy

- distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2015. – Т. 12. – № 5. – S. 263–284.
3. Abdelrahim, E. Monitoring and Yield Estimation of Sugarcane Using Remote Sensing and IS / E. Abdelrahim, A. Abdelaziem // American J. Engineering Research. – 2018. – V. 7. – №1. – P. 170–179.
4. Oficial'nyj sajt kompanii MicaSense. [sajt]. URL: <https://micasense.squarespace.com/atlasflight> (data obrashcheniya 11.03.2020).
5. NDVI – teoriya i praktika. [sajt]. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (data obrashcheniya 13.03.2020).
6. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators / B. Kosko// Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. – 1992. P. 1153–1162.
7. Kruglov V.V. Sravnenie algoritmov Mamdani i Sugeno v zadache approksimacii funkicii / V.V. Kruglov // Matematicheskaya morfologiya: elektronnyj matematicheskij i mediko-biologicheskij zhurnal. – 2001. – Т. 3. – №4. – S. 69–76.

Салманов Фуад Мухтар оглы, докторант, fuad.salmanli@sinam.net, Азербайджан, Баку, Институт систем управления Национальной Академии Наук Азербайджана.

FORMATION OF A MAP OF VEGETATION INTENSITY ASSESSMENT USING FUZZY ANALYSIS

F.M. Salmanov

Two fuzzy approaches are proposed for the quantitative assessment of photosynthetically active biomass in order to form a map for assessing of vegetation intensity and/or recognition of other objects under absence of vegetation. To identify the function for calculating the vegetation index, a fuzzy-set analysis of reflections in the red and near infrared regions of the electromagnetic spectrum is used.

Key words: vegetation index, multispectral reflection of objects, fuzzy set, membership function, fuzzy conclusion.

Salmanov Fuad Mukhtar, person working for doctor's degree, fuad.salmanli@sinam.net, Azerbaijan, Baku, Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Science.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №1(9) 2020 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление
- 05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы
- 05.02.00 Машиностроение и машиноведение

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(692)550077

<https://www.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/3655-avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashinopriborostroenii>

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Автоматизация и измерения в машино- приборостроении» обязательна.

Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33.
Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Копп Вадим Яковлевич

Подписано к печати 27.03.2020. Заказ 009К. Дата выхода в свет: 31.03.2020. Тираж: 50 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 12,32.

Севастополь, 2020