



Сборник материалов  
Всероссийской  
научно-методической  
конференции  
«Проектирование машин, роботов  
и мехатронных систем»

**Россия, Орел, 19-20 октября 2017**



ОРЛОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
имени И.С. Тургенева

УДК 621.004.896+621.865.8.001.2  
ББК 34.42  
П791

Редакционная коллегия:  
*Подураев Ю.В.*, д-р техн. наук, профессор  
*Савин Л.А.*, д-р техн. наук, профессор  
*Корнаев А.В.*, канд. техн. наук, доцент  
*Поляков Р.Н.*, канд. техн. наук, доцент  
*Тюрин В.О.*, аспирант

**П791 Проектирование машин, роботов и мехатронных систем.** Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции – Орел: ОГУ имени И.С.Тургенева, 2017. – 76 с.

Материалы Всероссийской научно-методической конференции содержат тезисы докладов ученых и специалистов в области интеллектуальных технологий, инженерного образования, исследования и проектирования мехатронных и робототехнических систем. Доклады объединены в три раздела: 1) мехатронные и робототехнические системы; 2) современные технологии проектирования машин, моделирование технических систем; 3) проблемы инженерного образования.

Материалы конференции предназначены для широкого круга научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, средних специальных учебных заведений, аспирантов и студентов.

Настоящее издание осуществлено при поддержке проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 9.2952.2017/4.6.

УДК 621.004.896+621.865.8.001.2  
ББК 34.42

**ISBN 978-5-9929-0514-4**

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2017  
© Коллектив авторов, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Направление I: Мехатронные и робототехнические системы.....</b>	<b>6</b>
Храмов А.Е. Интеллектуальные системы классификации состояний головного мозга и нейроинтерфейсы для медицины и робототехники.....	7
Рыбак Л.А. Проблемы проектирования, интеллектуального анализа и управления современными роботами и мультироботизированными системами .....	7
Дивин А.Г., Пономарев С.В., Чуриков А.А., Громов Ю.Ю. Применение систем технического зрения в роботизированных комплексах для сортировки сельскохозяйственной продукции .....	8
Савин Л.А. Гермо- и трибомехатроника как направления развития науки и техники.....	9
Куркин С.А., Мусатов В.Ю., Руннова А.Е., Храмов А.Е. Использование искусственных нейронных сетей для анализа мозговой активности человека во время воображаемых движений.....	10
Алейников А.Ю., Афонин А.Н. Исследование поведения змееподобного робота для инспекции трубопроводов в условиях отказа звеньев .....	11
Беляев А.С., Шибинский К.Г., Байдали А.С. Разработка энергоэффективного мехатронного модуля для альтернативной энергетики и других применений.....	12
Яцун А.С. Динамическая ходьба в экзоскелете .....	13
Илюхин Ю.В., Колесниченко Р.В. Анализ точности обработки круговых траекторий манипуляторами с однодвигательными и прецизионными двухдвигательными приводами .....	13
Ситникова М.А., Буковский А.И. Аппаратное обеспечение для роботизированной числовой линии .....	15
Макаров В.В. Концентрация при восприятии визуальных объектов: разработка нейроинтерфейса для тренировки внимания с биологической обратной связью .....	15
Крахмалев О.Н. Методы объектно-ориентированного моделирования движения манипуляционных систем роботов.....	16
Майоров С.В. Методология проектирования мехатронных машин с использованием САЕ-систем.....	17
Частухин А.В. Применение РТК для изготовления и восстановления изделий методом лазерного селективного спекания.....	18
Пицик Е.Н. Классификация паттернов ЭЭГ воображаемых движений с использованием методов машинного обучения.....	18
Яцун С.Ф., Дмитриев В.А., Лушников Б.В. Исследование динамики движения летательного аппарата с машущим крылом с помощью средств Matlab/Simulink/SimMechanics .....	20
Бабин А.Ю. О проектировании активных мехатронных гибридных опор роторов .....	21
Петрешин Д.И., Акулов П.А. Мехатронная система тестирования электрических соединителей ...	21
Волков А.А., Бучко И.А., Махова Н.Н. Динамический анализ и синтез роторных агрегатов с переменными инерционными свойствами.....	22
Климов В.Е. Мехатронный подход при разработке структуры горнопроходческого комплекса .....	23
Кирсанов Д.В., Горемыко М.В. Численный анализ конкурентных процессов в многослойной сети фазовых осцилляторов с использованием технологии параллельных вычислений CUDA .....	24
Новиков А.Н., Фетисов А.С. Мехатронные устройства автомобильного транспорта .....	25
Емельянова О.В., Поляков Р.Ю., Ефимов С.В., Яцун С.Ф. Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания .....	26
Поляков Р.Н., Грищенко Н.Е. Многофункциональная реабилитационная кровать с 3Д-профилем опорной поверхности .....	27
Крахмалев Г.Н. Методы калибровки инструмента промышленных роботов.....	28
Шутин Д.В., Токмаков Н.В., Горина М.А. Анализ элементов питания страхующих мехатронных устройств.....	28
Козырев Д.Л., Горин А.В. Мехатронная система виброзащиты .....	29
Яцун С.Ф., Барыбин А.А., Лушников Б.В., Политов Е.Н. Моделирование рыбоподобного робота в среде Matlab/ Simulink/SimMechanics .....	29
Селихов А.В., Мишин В.В., Подмастерьев К.В. Повышение эффективности диагностирования мехатронных систем .....	30
Усикова И.Г. Мехатронные технологии в системе «Умный дом» .....	31

Поляков Р.Н., Марахин Н.А. Экспериментальная установка по исследованию динамики ротора на АМП .....	32
Сытин А.В. Мехатронные опоры роторов с упругими элементами .....	33
Родичев А.Ю. Технологические аспекты в трибомехатронике .....	33
Горин А.В., Кравченко В.А., Горина М.А. Мехатронные механизмы на основе импульсного гидropневматического привода при бестраншейной прокладке трубопроводов .....	34
Шутин Д.В., Романов В.В., Стебаков И.Н. Роботизированный комплекс для кладки из блочных материалов .....	35
Фетисов А.С. Смазка мехатронных опор скольжения реомагнитными жидкостями.....	36
Колпакова С.В., Горин А.В., Юрьев Д.А. Мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода и влияние их на базовую машину.....	36
Внуков А.В., Бычков М.В., Сметанин Д.Н. Мехатронные устройства гермотехники и роторных машин .....	37
Чечина А.В. Вопросы планирования траекторий движения мобильных роботов с колёсным приводом.....	38
Лисицкий С.А. Проблемы управления бионическими конечностями .....	39

## **Направление II: Современные технологии проектирования машин. Моделирование технических систем .....**

Шелофаст В.В., Стайнова Е.Г., Прокопов В.С. Комплексный CAE-анализ – необходимое условие создания совершенных образцов современной техники .....	41
Крюков В.А. Разработка и тестирование имитационной модели червячной передачи.....	42
Бородина М.Б. Проектирование гидромеханических муфт с дифференциальным передаточным механизмом .....	42
Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В. Инженерный анализ и новые технологии в методе конечных элементов .....	43
Прейс В.В. Математическая модель фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающимися воронками .....	44
Коробко А.В., Калашникова Н.Г. Геометрическое моделирование формой в задачах технической теории пластинок .....	45
Тюрин В.О. Динамика роторов с лепестковыми газодинамическими подшипниками .....	46
Чернышев В.И., Фомина О.В. Разработка и верификация гироскопической модели роторной системы .....	47
Сытин А.В., Кузавка А.В. Лепестковые газодинамические подшипники с пьезоэлементами .....	48
Сливинский Е.В., Радин С.Ю., Гридчина И.Н. Исследование пространственных колебаний двухзвенного автопоезда .....	49
Прокопов Е.Е. Динамика систем виброзащиты с нелинейной характеристикой восстанавливающих сил .....	50
Канатников Н.В., Анисимов Р.В. Комплексная модель процесса обработки колес с внутренними незвольвентными зубьями .....	50
Корнеев А.Ю., Ли Шенбо Получение аналитической зависимости энтальпии смазочного материала в рабочем зазоре конического подшипника жидкостного трения .....	51
Мухаметзянова А.Г., Долгова Н.В. Численное моделирование гидродинамики в статическом смесителе Kenics KM .....	52
Корнаева Е.П., Корнаев А.В. Построение приближенных моделей неизотермических течений вязкой жидкости в конфузторных каналах на основе анализа безразмерных критериев подобия ...	54
Просекова А.В. Границы учета параметра шероховатости при моделировании работы роторно-опорного узла на базе подшипника скольжения .....	55
Шакулин О.П. О кинематике механизмов.....	55
Чернышев В.И., Савин Л.А., Фомина О.В. Управление динамическими процессами в системе «ротор-опоры» .....	56
Корнеев Ю.С., Корнеева Е.Н., Гордон В.А. Задача профилирования регулирующего диска пускозащитной муфты .....	57

Шевелев А.В. Лепестковый газодинамический подшипник с активным управлением .....	59
Сытин А.В., Родичев А.Ю., Кульков А.И. Биметаллические лепестковые газодинамические подшипники с биморфными пьезоэлектрическими лепестками .....	59
<b>Направление III: Проблемы инженерного образования .....</b>	<b>61</b>
Букалова Г.В. Концептуальная модель нормирования результата образования инженерного профиля .....	62
Космынин А.В., Чернобай С.П. О трудоустройстве выпускников вузов .....	62
Калекин А.А. Методологические и организационные проблемы довузовской инженерной подготовки школьников .....	64
Левый Д.В., Лакалина Н.Ю. Опыт реализации инженерного образования в центре молодежного инновационного творчества «Техномир» БГТУ .....	64
Савин Л.А., Поляков Р.Н. Методологическое, информационное и техническое обеспечение инженерного образования: проблемы и решения .....	66
Мищенко Е.В., Мищенко В.Я. Особенности преподавания курса «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование» .....	67
Волков В.Н., Стычук А.А. К вопросу о разработке электронного учебного комплекса общеинженерной подготовки .....	68
Черняева Е.В., Кожевникова И.Д. Применение коммуникативно-ориентированных проектов с целью формирования готовности к иноязычному профессиональному общению у будущих инженеров транспорта .....	69
Бурлакова Е.А., Колпакова С.В. Математика для инженерных специальностей .....	69
Поляков Р.Н. Проблематика адаптации подхода CDIO к реалиям высшего образования в России .....	70
Грядунова Е.Н. Применение интерактивной формы лекции в современном техническом образовании .....	71

**Направление I: Мехатронные и робототехнические системы**

Храмов А.Е.<sup>a</sup>

## Интеллектуальные системы классификации состояний головного мозга и нейроинтерфейсы для медицины и робототехники

Исследование механизмов и особенностей функционирования головного мозга человека находится в центре внимания мирового научного сообщества и является одним из наиболее интенсивно развивающихся и перспективных научных направлений. Такая проблематика на сегодня напрямую связана с формированием диагностических, обучающих и тренирующих систем на базе принципа биологической обратной связи (БОС) и дальнейшим созданием нейроинтерфейсов для различных целей и задач. Актуальность и научная востребованность данного направления привела к удвоению количества публикаций по тематике «когнитивная активность мозга», индексируемых в системе Web of Science, за последние пять лет. В первую очередь, очевидно, что познание самого процесса мышления человека – это важная фундаментальная задача с большим количеством приложений в интеллектуальной робототехнике и информационных технологиях. В частности, рост продолжительности жизни, фиксируемый практически по всему миру, в настоящее время привёл к реально стоящей проблеме эпидемиально возникающих патологических процессов в когнитивной деятельности человека, таких как болезни Альцгеймера и Паркинсона. Простые методы ранней диагностики и предсказания периода развития таких процессов, не связанные с поиском генетических маркеров, являются востребованными для медицины и социального обслуживания. К этой же проблеме примыкают диагностика и в некоторых случаях возможное лечение врожденных патологий в функционировании нейронной сети головного мозга, например, абсанс-эпилепсии, которая часто наблюдается у детей. Отдельным перспективным применением можно назвать работу на базе БОС с расширением когнитивного потенциала мозга или отдельных функциональных особенностей здоровых или условно здоровых людей в рамках расширения их профессионального потенциала или коррекции некоторых психофизиологических особенностей. Актуальной задачей для людей с ограниченными возможностями является разработка управляемых с использованием нейроинтерфейсов «умных» протезов – элементов экзоскелетов или полных экзоскелетов, инвалидными креслами и т.д.

В данной лекции планируется рассмотреть следующие вопросы:

1. Общее представление о проблеме нейроинтерфейса и типовая схема современного интерфейса мозг-компьютер.

2. Проблема создания интеллектуальных систем классификации состояний головного мозга с использованием аппарата нелинейной динамики и искусственного интеллекта.

3. Приложения нейроинтерфейсов в различных областях медицины, нейрофизиологии и робототехники.

4. Расшифровка паттернов активности головного мозга, соответствующих реальным и воображаемым движениям для использования в задаче управления элементом экзоскелета.

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант 17-72-30003).*

Рыбак Л.А.<sup>b</sup>

## Проблемы проектирования, интеллектуального анализа и управления современными роботами и мультироботизированными системами

В статье рассматриваются вопросы разработки роботизированных систем, способных планировать и осуществлять действия в неопределенных средах, а также функционировать в коллективе роботов при решении задач, требующих группового взаимодействия. Предлагается

<sup>a</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

<sup>b</sup> Белгородский государственный технологический университет имени В.Г.Шухова

комплексное решение задач, связанных с автоматизацией технологических операций, а также операций транспортировки и складирования с использованием нескольких роботов в киберфизической системе. Производительность такой системы во многом зависит от эффективности коммуникационного модуля и его надежности с учетом сетевых неопределенностей, таких как задержки сети и выпадения отдельных пакетов с данными. Таким образом, возникает проблема в интеграции киберфизической системы, включающей вычисления, связь, а также модуль управления автономными группами роботов. Решение указанной проблемы позволяет развить методы теории принятия решений, методы искусственного интеллекта, методы анализа, управления, оценивания и оптимизации динамических систем. Решение указанной проблемы реализуется в рамках пяти направлений исследований. Первое направление связано с развитием методов согласованного во времени и пространстве управления движением коллектива роботов на основе решения задач кинематики и динамики, а также оптимизационных задач аппроксимации рабочего пространства роботов. Разработаны методы, обеспечивающие повышение точности и скорости выполнения задач механической системой роботов в условиях неопределенных сред и внешних воздействий. Второе направление связано с созданием стратегии управления, основанной на техническом зрении, для обеспечения безопасной навигации группой мобильных роботов в неопределенной обстановке, при наличии препятствий и других подвижных объектов, с развитием методов распознавания и оценки состояния среды функционирования группой роботов, формирования информационных и навигационных полей, каналов связи. Третье направление связано с формированием мультиагентной роботизированной системы на основе подхода «лидер-последователь» с использованием различных методов интеллектуального управления. Особое внимание уделено вопросам устойчивости и настройки параметров регулятора, основанного на адаптивном методе быстрого управления скользящими режимами (NTSMC) для управления относительным движением роботов при действии возмущений. Четвертое направление включает разработку эффективного наблюдателя для отслеживания человека организованной группой роботов с помощью камеры, установленной на мобильной платформе. Сложность проблемы связана с наличием сбоев, возникающих при изменении освещенности, позы, размера или масштаба, движения камеры и частичной или полной окклюзии. Эти вопросы учтены при синтезе эффективных алгоритмов построения наблюдателя, интегрированного в общую структуру системы управления. Пятое направление связано с созданием программно-аппаратного комплекса для реализации разработанных алгоритмов, обеспечивающего высокопроизводительный обмен данными между многопоточным процессором, вычислительными алгоритмами, контроллерами, внешней периферией, доступ алгоритмов к ресурсам процессора и распределенным базам данных. Многокомпонентный программный комплекс ориентирован на выполнение вычислений, как на традиционных последовательных архитектурах, так и на параллельных вычислительных системах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение №16-19-00148.*

**Дивин А.Г., Пономарев С.В., Чуриков А.А., Громов Ю.Ю.<sup>а</sup>**

## **Применение систем технического зрения в роботизированных комплексах для сортировки сельскохозяйственной продукции**

В условиях рыночной экономики для агропромышленного комплекса страны особенно актуально решение проблемы повышения качества продукции, эффективности ее производства и хранения.

Необходимым условием сохранности продукции растительного происхождения является выбраковка из исходной массы объектов, поврежденных вследствие фитозаболеваний или механических воздействий. Существующие механические методы сортировки, как правило, не

<sup>а</sup> Тамбовский государственный технический университет



позволяют в полной мере обеспечить требований к качеству продукции, а сортировка овощей и фруктов до сих пор зачастую основана на непроизводительном ручном труде.

Решением данной проблемы может быть разработка роботизированных комплексов с применением систем технического зрения в видимой и инфракрасных областях спектра электромагнитного излучения.

В Тамбовском государственном техническом университете ведется разработка методов, моделей и алгоритмов, которые будут положены в основу информационного обеспечения роботизированного комплекса для сортировки овощей и фруктов. В качестве информации, необходимой для принятия решения о разбраковке, используется температурное поле объектов контроля после специально организованного теплового воздействия. При этом здоровые и поврежденные растительные ткани будут иметь различные температуры вследствие нарушения структуры тканей и различных их теплофизических характеристик. Теплофизические характеристики растительных тканей картофеля были исследованы с применением как стандартных методов и средств, так и разработанных авторами контактных и бесконтактных методов неразрушающего контроля. Проведенные численные эксперименты с трехмерными моделями объектов контроля, имеющих области с экспериментально найденными теплофизическими характеристиками, позволили определить оптимальные режимные параметры тепловых воздействий, после которых возможно получить максимальный температурный контраст между здоровыми и поврежденными участками [1].

Температурное поле сортируемых объектов регистрируется с частотой кадров до 60 Гц тепловизионной камерой FLIR A35, после чего, тепловизионное изображение обрабатывается с использованием пакета NI VISION. Разработанные алгоритмы обработки изображений позволяют надежно определять многие поверхностные и подповерхностные дефекты некоторых овощей и фруктов (в частности картофеля и яблок), а также формировать сигналы управления, используемые мехатронным модулем для разбраковки.

Кроме анализа изображений в инфракрасном диапазоне спектра для разбраковки объектов используется их анализ и в видимом диапазоне спектра. Это позволяет определять также объекты с нехарактерным для них цветом, а также несоответствующие по форме и размерам.

Разрабатываемые методы контроля позволят отказаться от традиционно используемых для решения этих задач дорогих InGaAs-камер, работающих в ближнем диапазоне инфракрасного спектра.

*Работа выполнена в рамках Соглашения № 14.577.21.0214 с Минобрнауки РФ (уникальный идентификатор RFMEFI57716X0214).*

Литература

1. Мищенко, С. В. Тепловой метод контроля качества объектов / С.В. Мищенко, А.Г. Дивин, Ю.Ю. Громов, П.В. Балабанов // Материалы конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». Тамбов. - 2016. С. 20-27.

**Савин Л.А.<sup>а</sup>**

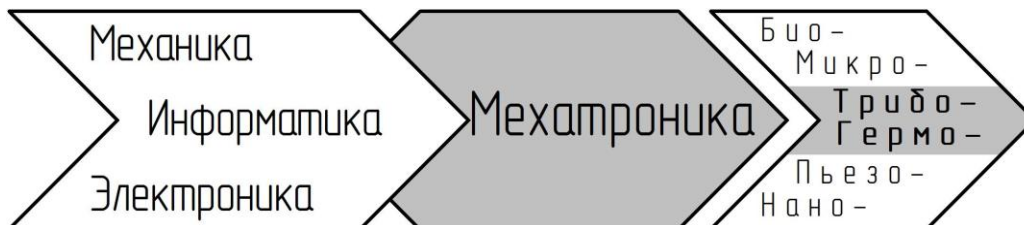
## **Гермо- и трибомехатроника как направления развития науки и техники**

Периоды интеграции и разделения отдельных направлений в мировой системе научно-технического развития наглядным образом проявляются на примере мехатроники, сформировавшейся во второй половине 20 века, объединив в себе элементы точной механики, пневмогидроавтоматики, силовой электроники и информационных технологий. Практически одновременно с объединяющей фазой начался процесс дифференциации с выделением таких специализированных направлений как био-, микро-, пьезо-, наномехатроника, каждое из которых используя общие для мехатроники методы и принципы, способствовало их применению в

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

различных быстро развивающихся областях с возможностью получения качественно новых знаний и технологий. Объективные факты появления в перспективных технических системах, прежде всего, в роторных агрегатах силовых установок транспортных средств и технологического оборудования, устройств с встроенными функциями автоматизированной диагностики и процессорного управления режимами функционирования, а также публикация в журналах результатов теоретических и экспериментальных исследований, свидетельствуют о наличии предпосылок формирования двух новых направлений мехатроники, связанных с совершенствованием работы трибосопряжений и уплотнений. В общем случае трибо- и гермомехатронные системы включают в себя три базовые группы устройств: 1) систему управления с сенсорными, программными и процессорными элементами; 2) исполнительные механизмы с электромеханическим, пневмогидравлическим, электромагнитным и пьезоэлектрическим принципом действия; 3) совокупность узлов трения и/или герметизации.

В докладе излагаются доводы о возможности выделения трибомехатроники и гермомехатроники в самостоятельные направления науки и техники, представляющие собой конвергенцию научных основ, методов и технических решений триботехники и герметики с мехатронным подходом. Представлена расширенная классификация узлов трения и уплотнений с учетом вариантов активного управления режимами работы. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также принципы функционирования оригинальных технических решений различных видов опор роторов с процессорным управлением.



*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 16-19-00186 «Планирование оптимальных по расходу энергии траекторий движения роторов мехатронных модулей в средах сложной реологии».*

Куркин С.А., Мусатов В.Ю., Руннова А.Е., Храмов А.Е.<sup>а</sup>

## **Использование искусственных нейронных сетей для анализа мозговой активности человека во время воображаемых движений**

Развитие методов распознавания мозговой активности, связанной с осуществлением и с воображением движений, является принципиально необходимым для разработки интерфейсов «мозг-компьютер». Ряд последних исследований, проведенных с тренированными испытуемыми, показывает, что задача идентификации мозговой активности, ассоциированной с движениями, может быть решена путём анализа многоканальных электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Решение подобной задачи в случае работы с нетренированными испытуемыми является существенно более сложным, важным и малоизученным вопросом.

В данной работе с использованием аппарата искусственных нейронных сетей осуществлены распознавание и классификация соответствующих воображаемым движениям паттернов на ЭЭГ, полученных у группы нетренированных испытуемых (12 человек). Заметим, что для организации функционирования интерфейса «мозг-компьютер» с целью управления элементами экзоскелета важно разделение воображаемых движений левой и правой рук и ног, поэтому в проведенном исследовании большее внимание уделено классификации воображаемых

<sup>а</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

движений не только рук, но и ног. Для случая управления экзоскелетом или антропоморфным роботом этот канал вызывает большой интерес.

Сигналы ЭЭГ были получены в ходе серии экспериментов на электроэнцефалографе Энцефалан ЭЭГР-19/26 со стандартной схемой подключения электродов 10-10, когда испытуемый воображал отдельные движения своих рук и ног, не производя самих движений. Во время пост-обработки сигналы ЭЭГ разделялись на фрагменты, соответствующие различным периодам эксперимента: реальное или мнимое движение левой или правой руки/ноги, фрагменты различной фоновой активности. Продолжительность выделения временных интервалов в виде отмеченных фрагментов, связанных с двигательной активностью, варьировалась от 1.5 до 4.0 секунд.

Классификация проводилась методом искусственных нейронных сетей (ИНС), обученных с учителем, с использованием пакетов программного обеспечения на основе MatLab. В процессе классификации сравнивалось качество распознавания ИНС различных архитектур и типов: многослойный перцептрон (МП), радиальная базисная функция (РБФ), линейная (ЛН) и вероятностная нейронная сеть (ВНС). Классификация воображаемой двигательной активности левой и правой рук с использованием ВНС, ЛН и МП происходит в большинстве случаев с низким качеством распознавания на уровне 50-55%. В некоторых случаях ВНС позволяет достичь уровня распознавания 75-80%. Классификация различных движений левой и правой ног показывает лучшие результаты. Качество распознавания с ЛН и ВНС составляет 55%, МП – 60-70%, РБФ дает лучшее качество распознавания на уровне 85-89%. Заметное (на 5-10%) увеличение качества распознавания позволяет достичь применение полосовых фильтров низких частот (4-15 Гц).

Также изучено влияние количества и расположения электродов на качество распознавания воображаемых движений. Были получены оптимальные конфигурации расстановок электродов. Экспериментально показано, что возможно достичь приемлемого качества классификации (выше 70%) при использовании только части каналов ЭЭГ с небольшим количеством электродов, что важно при создании интерфейсов «мозг-компьютер».

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант 17-72-30003).*

**Алейников А.Ю., Афонин А.Н.<sup>а</sup>**

## **Исследование поведения змееподобного робота для инспекции трубопроводов в условиях отказа звеньев**

Змееподобные роботы являются одними из перспективных устройств для инспекции трубопроводов. Наличие у них большого числа степеней свободы дает им возможность передвигаться самим и перемещать различное диагностическое оборудование в практически любом направлении, в том числе и вертикальном, непосредственно в трубопроводе. Значительное количество степеней свободы предполагает наличие соответствующего количества исполнительных узлов – сервоприводов и электронных модулей, их обслуживающих, что может сказаться на надежности и работоспособности всего устройства в целом из-за потенциальной возможности возникновения отказов в отдельных звеньях или в их наборе. Большинство из существующих змееподобных роботов не способны реализовать компенсаторное поведение при повреждениях. В случае выполнения диагностической задачи непосредственно в трубе под землей это может привести к необходимости проведения дорогостоящих мероприятий по эвакуации застрявшего устройства.

Потеря управления звеньями робота может характеризоваться двумя принципиально отличными состояниями звеньев – звено блокируется (заклинивается) в одном из положений либо просто свободно болтается. Если в первом случае изменить угол поворота звена как правило не представляется возможным, то во втором случае изменить угол поворота звена можно посредством внешнего усилия, например, за счет рабочих сервоприводов других звеньев. В последнем случае степень нагруженности звена, то есть значение момента внешней силы,

<sup>а</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет

необходимой для поворота звена, определяется непосредственно характером и расположением повреждения в цепи зубчатых колес редуктора сервопривода.

С целью выявления повреждений звеньев одновременно с подачей команд на осуществление изменения угла поворота выполняется контроль результатов их отработки непосредственно сервоприводами, а также их токовое потребление. Теоретически задаваемое положение звеньев змееподобного робота может быть найдено с использованием подхода, применяемого при работе с многозвенными манипуляторами робототехнических систем – представление Денавита-Хартенберга.

Одним из элементов общего решения для обоих видов повреждений (болтание и заклинивание) может быть виртуальное увеличение длины звена в окрестности повреждения.

Для случая болтания дальнейшим решением должна быть выработка компенсаторного поведения, когда в задачу остальных звеньев будет входить задача выравнивания, исходя из текущего угла поворота болтающего звена, который можно измерить внутренним датчиком угла.

При прямолинейном движении в зависимости от расположения дефекта заклинивание может приводить к тому, что с одной стороны уменьшается количество звеньев, работающих на движение «вперед»; появляются работающие звенья, которые «тянут змею в бок», а также противодействуют передвижению змеи «вперед» своей площадью, находящуюся поперек направлению движения. Таким образом, для данной ситуации необходимо единожды произвести выравнивание тела змеи за счет рабочих звеньев посредством внесения соответствующей дельты в углы поворота  $\varphi_i(t)$ , и в дальнейшем ее учитывать при расчетах  $\varphi_i(t)$ .

**Беляев А.С., Шибинский К.Г., Байдали А.С.<sup>а</sup>**

## **Разработка энергоэффективного мехатронного модуля для альтернативной энергетики и других применений**

В рамках работы над проектом «Разработка и организация высокотехнологичного производства масштабируемых систем энергоэффективных мехатронных устройств и интеллектуальных систем управления для альтернативной энергетики и других применений» был создан мехатронный модуль для поворота фотобатареи солнечной электростанции. В механической части модуля применен редуктор, выполненный на базе кулачковой коаксиальной радиальной плоской передачи с промежуточными телами качения. Данные передачи воспринимают нагрузку примерно половиной зубьев циклоидального колеса, то есть зубья колеса на угле примерно  $180^\circ$  находятся в рабочей зоне. Это позволяет передавать большие вращающиеся моменты относительно зубчатых передач при одинаковых массо-габаритных показателях. Получены основные кинематические параметры данной передачи: определено передаточное отношение и выведено уравнение профиля зуба колеса. Установлено, что при одинаковом передаточном отношении редуктора и отличием числа тел качения на единицу от числа зубьев профильного колеса возможно получение разного направления вращения выходного звена передачи. По конструктивным габаритам спроектирован редуктор, который расположен внутри полости ротора электродвигателя 3 ДБМ 70-0,16-3-3. Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния редуктора в системе SolidWorks с максимальным выходным крутящим моментом 1,5 Н·м, которое показало, что наиболее нагруженными деталями являются сепаратор и профильное колесо.

В электронной части проанализирована конструкция заданного BLDC двигателя, которые получают все более широкое применение, однако разработка системы управления такими двигателями усложнена по сравнению с двигателями постоянного тока. В работе проведена разработка электронной части мехатронного модуля. Выбраны основные компоненты и приведена структурная схема системы управления, обеспечивающая требуемый функционал. В качестве контроллера управления был выбран STM32F407. Рассмотрены основные алгоритмы управления

<sup>а</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

BLDC двигателями, такие как Six-step и синусоидальное. Однако вследствие того, что в двигатели отсутствуют датчики Холла, предложены методы управления, адаптированные с использованием информации о положении вала двигателя с энкодера. Предложен алгоритм определения температуры обмоток двигателя, для предохранения двигателя от перегрева и, как следствия, поломки. В качестве метода стабилизации скорости был использован ПИД-регулятор. Так как в процессе эксплуатации двигателя подвержены процессам старения, их внутренние параметры изменяются, вследствие чего настройки регуляторов скорости вращения двигателей перестают быть оптимальными. Поэтому предложен интеллектуальный алгоритм управления настройками ПИД-регулятора, стабилизирующего скорость вращения на основе генетических алгоритмов. Приведено исследование данного алгоритма на математической модели, приведены переходные характеристики до и после использования алгоритма.

Яцун А.С.<sup>a</sup>

### Динамическая ходьба в экзоскелете

Появление экзоскелетов открывает новые возможности в реабилитации пациентов, имеющих повреждение нижних конечностей, что позволяет адаптировать их к условиям реальной жизни. Несмотря на рост публикаций по этой тематике, многие вопросы, связанные с разработкой инструментальных средств проектирования на основе моделирования движения человека в экзоскелете с использованием теоретических основ устойчивого движения в вертикальном положении, изучены недостаточно. Движение пациента на значительные расстояния требует перехода к быстрой (динамической) ходьбе. При этом, величина сил инерции при ходьбе может быть значительной и по уровню достигать значений гравитационной составляющей. Направление главного вектора и главного момента сил инерции изменяется во времени и зависит от вида выполняемого экзоскелетом движения, поэтому были сформулированы условия устойчивой динамической ходьбы с использованием теории точки нулевого момента (ZMP). Предложена модель траектории движения ZMP в виде синусоиды. Получены дифференциальные уравнения для определения закона движения центра масс экзоскелета по опорной поверхности в зависимости от заданных параметрических уравнений движения ZMP. Установлена связь между амплитудой ZMP и амплитудой центра масс. Показано, что для рассматриваемого случая амплитуда центра масс зависит от вертикальной координаты центра масс, времени выполнения шага и амплитуды ZMP.

Илюхин Ю.В., Колесниченко Р.В.<sup>b</sup>

### Анализ точности отработки круговых траекторий манипуляторами с однодвигательными и прецизионными двухдвигательными приводами

В настоящее время проявляется тенденция к расширению сферы применения технологических роботов и ужесточению требований к точности их движений. Точность движений роботов зависит от ряда факторов, в том числе от типа используемых следящих приводов. При выборе варианта построения манипуляторов таких роботов важно иметь оценки их точности при отработке типовых траекторий движения, к числу которых относятся круговые траектории, часто рассматриваемые в качестве тестовых.

В результате проведения компьютерного моделирования получены оценки точности движений по круговым траекториям манипуляторов ангулярного типа с двумя вариантами следящих приводов: с двухдвигательными редукторными следящими приводами, замкнутыми по

<sup>a</sup> Юго-Западный государственный университет

<sup>b</sup> Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»



положениям звеньев манипулятора, и с традиционными для промышленной робототехники однодвигательными редукторными следящими приводами, замкнутыми по положению вала двигателя. Рассмотрены движения манипулятора с абсолютно жёсткими звеньями, имеющего четыре степени подвижности. Три из них обеспечивают движение манипулятора в вертикальной плоскости, а ещё одна создаёт вращение колонны относительно вертикальной оси. При этом учитывается влияние динамических свойств приводов, люфта и жёсткости их механических передач на точность движений. Значения частот собственных колебаний механических подсистем составляют 41 рад/с в приводах колонны и плечевого звена манипулятора, 59 рад/с в приводе локтевого звена и 68 рад/с в приводе кистевого звена. Частоты среза всех разомкнутых однодвигательных и двухдвигательных приводов равны 29 рад/с и 11 рад/с соответственно.

Точность движений манипулятора в установившемся режиме движения оценивается двумя показателями. Первый из них – среднеквадратическое радиальное отклонение фактической траектории движения рабочего органа манипулятора от желаемой круговой траектории. Вторым является среднеквадратическое осевое отклонение рабочего органа манипулятора по нормали к плоскости, в которой находится желаемая траектория движения. Некоторые результаты исследования точности движений в горизонтальной плоскости рабочих органов манипуляторов с разными типами приводов приведены в таблице.

Таблица

Контурная скорость, мм/с	Радиус желаемой окружности, мм	Радиальное среднеквадратическое отклонение, мкм		Коэффициент повышения точности
		Для манипулятора с однодвигательными приводами	Для манипулятора с двухдвигательными приводами	
25	10	704,76	265,05	2,7
5	10	697,61	11,01	63,4
25	150	682,5	18,53	36,8

Результаты компьютерного моделирования движений манипуляторов с двумя рассмотренными типами следящих приводов по круговым желаемым траекториям с разными значениями радиусов и при различной контурной скорости свидетельствуют о преимуществах манипуляторов, оснащённых прецизионными двухдвигательными приводами. Во всех рассмотренных вариантах отработки круговых траекторий движения среднеквадратические радиальные и осевые отклонения от заданной траектории для манипулятора с двухдвигательными приводами оказались существенно меньше, чем для манипулятора с однодвигательными приводами. Например, движение в вертикальной плоскости рабочего органа манипулятора с двухдвигательными приводами при контурной скорости 5 мм/с и радиусе 10 мм происходит с погрешностью, в 88 раз меньшей, чем при движении манипулятора с однодвигательными приводами традиционного типа, замкнутыми по положению вала двигателя. Разброс значений среднеквадратических отклонений манипулятора с двухдвигательными приводами при изменении скорости, радиуса и положения центра окружности примерно в 30 раз меньше, чем те же показатели для манипулятора с однодвигательными приводами.

Более высокая точность манипуляторов, оснащённых двухдвигательными следящими приводами, обусловлена замыканием главных обратных связей по положениям звеньев манипулятора. Это обеспечено благодаря наличию активных люфтовывбирающих устройств, структурным особенностям управляющих частей таких приводов и реализации импедансного управления.

Результаты исследования позволяют рекомендовать построение манипуляторов промышленных роботов на основе двухдвигательных следящих приводов для осуществления технологических операций, требующих повышенной точности, например, роботизированной прецизионной лазерной резки и сварки.

Ситникова М.А., Буковский А.И.<sup>а</sup>

## Аппаратное обеспечение для роботизированной числовой линии

Приобретение математических способностей имеет большое значение как для каждого конкретного человека, так и для общества в целом. Отсутствие или недостаточная сформированность основных математических навыков и понимания числовых величин впоследствии может привести к проблемам в карьерном росте и снижению качества жизни в целом.

Сегодня у многих взрослых и детей наблюдается боязнь математики (math anxiety). Ученые считают это полноценной фобией в современном обществе, проявляющейся как сильно выраженный навязчивый страх. Математическая фобия начинается с непонимания основ математики, с отсутствия интереса к сложным абстрактным понятиям.

Предотвратить возникновение и развитие, а также скорректировать уже начавшую формироваться математическую фобию в старшем дошкольном и младшем школьном возрасте помогают развивающие занятия, которые в увлекательной игровой форме позволяют научить ребенка выполнять сравнение числовых величин, определять позицию числа на числовой линии. Включение в тренинг элементов соревнования с другими детьми или даже социальными роботами в качестве партнеров по социальному взаимодействию позволит сделать его более продуктивным, достичь более значимых результатов в развитии математических навыков. Использование в качестве партнера ребенка робота дает возможность управлять сложностью соревнований, позволяя ребенку выигрывать достаточно часто, чтобы повысить его мотивацию.

Целью нашего исследования является разработка пространственно-числового тренинга с помощью роботизированного программно-аппаратного комплекса «Числовая линия». Все компоненты комплекса синхронизированы и связаны в беспроводную локальную сеть (центральный компьютер, к которому присоединен проектор, 2 дальномера, лазерный построитель числовой линии, 2 цифровых коробки).

Математические задания выводятся на экране проектора, который должен быть закреплен на стене в видимой доступности для обоих участников. Так как все математические задачи требуют оценки положения числа на числовой линии, ребенок и робот одновременно начинают двигаться вдоль числовой линии. Лазерная числовая линия состоит из двух сплошных линий, созданных при помощи лазерного излучателя с небольшой мощностью излучения (сопоставимой с лазерной указкой), закрепленного на потолке. С целью фиксации ответа на числовой линии, робот и ребенок могут ставить коробочки, чтобы блокировать сегменты на числовой линии (сегменты до и после выбранного в качестве ответа числа автоматически блокируются). При этом на одно и то же место можно поставить только одну коробку. Расстояние от начала числовой линии до ребенка и робота определяется при помощи двух лазерных дальномеров с изменяемым углом поворота. Также, с помощью лазерных дальномеров определяется текущее местоположение коробок. Эта схема может быть реализована в различных типах взаимодействия: ребенок – робот, ребенок – ребенок.

Макаров В.В.<sup>б</sup>

## Концентрация при восприятии визуальных объектов: разработка нейроинтерфейса для тренировки внимания с биологической обратной связью

В настоящий момент исследование принципов обработки визуальной информации в головном мозге уже не является только фундаментальной задачей, связанной с пониманием

<sup>а</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет

<sup>б</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

организации физиологических процессов. Развитие технологий регистрации электрической активности головного мозга, в том числе миниатюризация аппаратной части таких устройств [1], делает расшифровку процессов восприятия одной из прикладных задач на пути к созданию интерфейсов мозг-компьютер и нейроассистентов с биологической обратной связью, повышающих концентрацию, когнитивные способности и стрессоустойчивость [2].

Одним из наиболее эффективных инструментов исследования визуального восприятия являются бистабильные изображения, представляющие из себя композицию из нескольких объектов, восприятие которых возможно только изолированно друг от друга. Наиболее известным примером таких изображений является ваза Рубина, на которой можно поочередно увидеть два человеческих лица или же вазу между ними. Тем не менее, процесс восприятия большинства таких изображений зависит в основном от психологического состояния человека, а, следовательно, его сложно формализовать и контролировать. Исключением является куб Неккера [3] – объемная геометрическая фигура, ориентация которой в пространстве зависит от видимости его граней. Изменение непрозрачности его граней позволяет контролировать степень неоднозначности такого изображения и, как следствие, когнитивную нагрузку на визуальную систему мозга.

В настоящей работе было исследовано, как влияет концентрация человека, а также его мотивация, на процесс восприятия неоднозначных визуальных объектов в головном мозге. Исследования визуального восприятия проводилось с помощью анализа электрической активности головного мозга у добровольцев, которым многократно предъявлялся куб Неккера с различной степенью интенсивности граней. При каждом предъявлении испытуемый делал выбор в какую сторону направлена геометрическая фигура с помощью джойстика. Спектральный анализ записей активности мозга показал, что все эпизоды восприятия можно разделить на два сценария. Задействовав две группы добровольцев, одна из которых была материально мотивирована, а также проведя анализ корректных выборов ориентации куба, экспериментально было определено, что один из сценариев соответствует концентрации при восприятии изображения. На основе выявленных закономерностей активности мозга разработан нейроинтерфейс для тренировки концентрации, действующий по принципу биологической обратной связи.

*Работа поддержана Российским научным фондом (грант 16-12-10100).*

Литература

1. Hassanien A.E., Azar, A.A. Brain-Computer Interfaces. 2015. Switzerland: Springer.
2. Jin J., Zhang H., Daly I., Wang X., Cichocki A. An improved P300 pattern in BCI to catch user's attention. Journal of Neural Engineering. 2017. 14(3). 036001.
3. Mathes B., Strubera D., Stadlera M.A., Basar-Eroglu C. Voluntary control of Necker cube reversals modulates the EEG delta- and gamma-band response. Neuroscience Letters. 2006. 402(1-2). 145-149.

Крахмалев О.Н.<sup>а</sup>

## Методы объектно-ориентированного моделирования движения манипуляционных систем роботов

Рассмотрены методы моделирования движения манипуляционных систем роботов, реализованные на основе объектно-ориентированного подхода. Объектно-ориентированный подход реализуется путём выделения в структуре данных и алгоритмов, используемых при моделировании базовых классов, на основе которых создаются другие более сложные классы, из которых уже непосредственно формируются математические модели. В качестве базовых классов выделены геометрическая и инерционная модели манипуляционных систем. Последующее определение классов, наследующих свойства базовых, позволяет использовать объектно-ориентированный подход при составлении математических моделей манипуляционных систем и

<sup>а</sup> Брянский государственный технический университет



программировании алгоритмов, реализующих эти модели. Метод визуального конструирования математических моделей состоит в том, что различные математические модели строятся из отдельных, независимых друг от друга, частей-объектов. Эти части, в свою очередь, могут состоять из других более простых частей. В основе таких составных частей находятся объекты базовых классов или объекты, наследующие их свойства. Метод целенаправленных структурных мутаций в моделях механизмов позволяет создавать приближённые модели механизмов, в частности манипуляционных систем, путём модификаций их математических моделей. Модификация проводится в некоторых местах структурной схемы математической модели путём замены выбранных объектов на альтернативные им объекты. Применение данного метода позволяет компенсировать влияние случайных факторов, не учитываемых аналитической моделью.

Майоров С.В.<sup>а</sup>

### **Методология проектирования мехатронных машин с использованием CAE-систем**

На современном уровне развития техники все большее внимание уделяется разработке новых образцов машин, основанных на ключевой парадигме мехатроники – синергетическом эффекте. При этом стоит отметить, что базовым элементом мехатронной машины является информационная среда, обеспечивающая взаимосвязи между составными частями системы различной физической природы. Для описания поведения таких систем используется традиционный подход, основанный на системотехническом представлении со средой автоматизированного управления. Автоматизированные системы управления предназначены для управления каким-либо процессом, в том смысле, чтобы обеспечить некоторую наперед заданную целевую функцию.

При современном уровне развития вычислительной техники, а также технологий в различных областях человеческой деятельности, при внедрении АСУ для реальных объектов возникают следующие практические задачи: 1) разработка модели объекта управления; 2) симуляция возможных режимов функционирования объекта регулирования на виртуальной модели с целью ее оценки адекватности последней; 3) построение (выбор) модели регулятора (системы управления) по возможности оптимальной, удовлетворяющей целевым функциям, а также совмещение регулятора и объекта управления в единую модель; 4) выбор значений свободных параметров регулятора, позволяющих достигнуть требуемых критериев качества системы управления; 5) симуляция возможных режимов функционирования АСУ и объекта регулирования на виртуальной модели с целью проверки качества системы управления; 6) симуляция возможных режимов функционирования АСУ на реальном объекте регулирования.

В целях обеспечения импортонезависимости в области вычислительных технологий ООО НТЦ «АПМ» ведет разработку отечественной платформы, предназначенной для проектирования и анализа автоматизированных систем управления, имеющей многомодульную структуру кластерного принципа. Кластер содержит модули имитационного моделирования физических систем, обеспечивающие инструментальные возможности по созданию графической репрезентации и математического обеспечения систем различной физической природы. Кластер – модуль программной среды, позволяющий согласовывать сигналы, поступающие от объектов различной физической природы, а также оперировать над согласованными сигналами. Кластер – модуль интерфейса обработки сигналов, поступающих с цифровых первичных и аналого-цифровых преобразователей.

Отдельным аспектом проектирования мехатронных систем является учет отраслевых и межотраслевых стандартов, характерных для различных типов подсистем, используемых в мехатронной машине.

<sup>а</sup> ООО Научно-технический центр «АПМ»

Частухин А.В.<sup>a</sup>

## Применение РТК для изготовления и восстановления изделий методом лазерного селективного спекания

Цель данной работы – рассмотреть возможность применения робототехнических комплексов для реализации технологии прямого лазерного выращивания.

В работе рассмотрены преимущества использования промышленных роботов по отношению к классическим 3D-принтерам портального типа. Среди преимуществ уделено внимание следующим моментам: возможность обработки крупногабаритных изделий, экономичность, минимизация количества поддержек.

Рассмотрена технология прямого лазерного выращивания с точки зрения программирования и управления промышленным роботом. Обосновано применение САМ-систем (computer-aided manufacturing) при проектировании управляющих программ для робота. Разобрана последовательность работы и функционал САМ-системы для выполнения таких работ.

Порядок действий, необходимый для получения управляющей программы в САМ-системе:

1. Генерировать управляющую траекторию для каждого элемента с учетом выбранной стратегии.

2. Согласовывать управляющую траекторию с кинематикой промышленного робота.

- 2.1 Учитывать зоны досягаемости робота.

- 2.2 Учитывать предел перемещения по каждой оси робота.

- 2.3 Учитывать зоны сингулярности робота.

- 2.4 Учитывать зоны, в которых возможны коллизии в виде соударений органов робота, лазерной головки, оснастки и детали.

3. Моделировать технологический процесс выращивания детали.

4. Преобразовывать полученную траекторию в управляющую программу конкретного робота.

Разработан специальный модуль, учитывающий 3D-модель и кинематику промышленного робота KUKA KR-15. Модуль передает данные в САМ-систему для дальнейшего анализа зоны досягаемости робота, пределов перемещения осей, зоны сингулярности и коллизии. В качестве САМ-системы выбрано российское программное обеспечение SprutCAM. Следуя приведенному порядку действий, получена управляющая программа для выращивания лопаток детали типа «Колесо».

Приведенный пример получения программы может быть использован для других моделей шести осевых промышленных роботов последовательной структуры.

Пицик Е.Н.<sup>b</sup>

## Классификация паттернов ЭЭГ воображаемых движений с использованием методов машинного обучения

Электроэнцефалография (ЭЭГ) является наиболее распространённым способом исследования электрической активности головного мозга, способным дать исчерпывающую информацию о психологическом и физиологическом состоянии человека. Любая деятельность человека находит отражение в работе мозга в виде определённых паттернов, например: паттерны, соответствующие стадиям сна, эпилептические паттерны и т.д. Обнаружение паттернов ЭЭГ является важной задачей нейродинамики и нейрофизиологии, имеющей, кроме того, принципиальную значимость для разработок в области проектирования роботов и мехатронных систем. В данной работе предлагаются методы классификации ЭЭГ-паттернов, соответствующих

<sup>a</sup> ООО «Центр СПРУТ-Т»

<sup>b</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

различным типам воображаемых движений, на основе технологий машинного обучения, а также рассматривается перспектива применения этих методов в разработке системы управления движениями робота. Распознавание воображаемых движений по данным ЭЭГ является важной задачей, находящейся на стыке медицины и нейронауки. Решения этой задачи могут найти применения, например, для реабилитации людей с ограниченными возможностями с помощью ортезов и протезов, для проектирования мехатронных систем, роботов, систем управления и т.д. При этом одним из наиболее точных методов распознавания представляется классификация данных с помощью нейронных сетей, которые активно используются для задач обработки данных в интерфейсах мозг-компьютер [1-3]. В данном исследовании представлены сравнения результатов работы метода опорных векторов и многослойного перцептрона.

Метод опорных векторов (SVM – support vector machine) – набор алгоритмов машинного обучения, способный осуществлять достаточно эффективную классификацию данных. Суть данного метода заключается в переводе классифицируемых объектов (векторов) в пространство высокой размерности, а затем поиск гиперплоскости, разделяющей классы объектов. Минимизация ошибки осуществляется за счёт построения двух параллельных гиперплоскостей по обе стороны от разделяющей гиперплоскости и увеличением расстояния между ними: чем больше это расстояние, тем меньше ошибка классификации. Таким образом, точность алгоритма напрямую зависит от выбора разделяющей гиперплоскости.

Второй рассматриваемой моделью является многослойный перцептрон (MLP – multilayer perceptron) – нейронная сеть прямого распространения. В общем случае многослойный перцептрон состоит из одного входного слоя, состоящего из входных нейронов, одного выходного слоя, выводящего результат работы сети, и одного или нескольких скрытых слоёв с вычислительными нейронами. Обучение нейросети производится по алгоритму обратного распространения ошибки: ответ нейросети сравнивается с ожидаемым результатом, после чего алгоритм обучения изменяет весовые коэффициенты сети таким образом, чтобы минимизировать ошибку на следующем этапе обучения.

Таблица 1

Модель	Для левой руки		Для правой руки	
	Точность	Ошибка	Точность	Ошибка
SVM	83,3%	0,36	88,5%	0,31
MLP	78,8%	0,47	85,4%	0,36

В данной работе использовался перцептрон с двумя скрытыми слоями, с гиперболической и логистической функциями активации соответственно. Обучение производилось на данных 32-канальной записи ЭЭГ. Данные записывались с частотой дискретизации 250 Гц в течении 3 секунд, во время которых оператор представлял себе движения правой и левой рукой. Результаты классификации представлены в таблице 1. Метод опорных векторов достигает точности 88,5% в классификации воображаемых движений правой рукой и 84,5% для левой руки, в то время как наилучший результат перцептрона составляет 85,4% для правой руки и 78,8% для левой. В результате исследования были получены результаты классификации ЭЭГ-паттернов, соответствующих воображаемым движениям. Даже на «сырых» данных, не подвергавшихся пре-обработке и фильтрации, был получен неплохой показатель точности классификации. Однако, для применения этих алгоритмов в разработке системы управления движениями робота необходимо значительно повышать точность прогноза, полученного в результате работы алгоритма. Достижение такого результата планируется за счёт пре-обработки данных ЭЭГ с использованием эффективных методов анализа сигнала, например, на основе вейвлет-преобразования.

#### Литература

1. Balakrishnan D., Puthusserypady S. Multilayer perceptrons for the classification of brain computer interface data. Proceedings of the IEEE 31st Annual Northeast Bioengineering Conference, 2005. P. 118-119.
2. Abdalsalam E., Yusoff M.Z., Kamel N., Malik A.S., Mahmoud D. Classification of Four Class Motor Imagery for Brain Computer Interface. 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol 398. 2016. P. 297-305
3. Ilyas M.Z., Saad P., Ahmad M.I. and Ghani A.R.I. Classification of EEG signals for brain-computer interface applications: Performance comparison. 2016 International Conference on Robotics, Automation and Sciences (ICORAS), Melaka, 2016. P. 1-4.

Яцун С.Ф., Дмитриев В.А., Лушников Б.В.<sup>а</sup>

## Исследование динамики движения летательного аппарата с машущим крылом с помощью средств Matlab/Simulink/SimMechanics

В современном мире всё большее применение находят миниатюрные беспилотные летательные аппараты. Среди большого многообразия их видов определенные преимущества имеют аппараты с машущим крылом: бесшумность работы, высокая маневренность, энергоэкономичность в режимах планирования, скрытность при возможности имитации полёта птиц.

С целью исследования динамики летательного аппарата с машущим крылом (так называемого орнитоопера) и изучения влияния его параметров на характеристики движения, была разработана математическая модель, реализованная средствами блочного имитационного моделирования Simulink/SimMechanics пакета Matlab. В качестве объекта исследования был принят аппарат с двумя машущими крыльями, состоящий из пяти соединённых между собой звеньев, оснащенных электроприводами, одно из которых являлось моделью корпуса, другие – двухзвенных крыльев. Разработанная компьютерная программа прошла всестороннюю проверку на адекватность, показавшую достоверность получаемых результатов моделирования.

Тяговые подъёмные силы, возникающие при маховых движениях крыльев робота-орнитоопера, достигаются асимметрией аэродинамических сил и обусловлены специфическими законами каждого из звеньев крыла, имитирующими аналогичные законы полета бионического прототипа – чайки.

В качестве промежуточных результатов исследования движения орнитоопера были получены и представлены графики относительных и абсолютных законов движения каждого из звеньев крыла при одном его махе, силы аэродинамического сопротивления, действующие на каждое из звеньев крыла, а также равнодействующих сил и моментов, приведенных к центру масс махолёта.

В процессе математического компьютерного моделирования робота-орнитоопера с геометрическими и массо-инерционными параметрами, близкими к параметрам чайки, была исследована зависимость нахождения аппарата в одном из трёх режимов полёта от частоты махов крыльев: взлёт, зависание и снижение. В результате исследования было установлено, что при варьировании частоты махов крыльев на частотах  $\omega \geq 50$  рад/с аппарат находится в режиме взлёта, при частоте порядка  $\omega \approx 50$  рад/с – в режиме зависания, а при  $\omega \leq 50$  рад/с – в режиме снижения.

Математическая модель динамики полёта робота позволяет определить требуемые мощности приводов звеньев крыльев, подобрать оптимальные соотношения площадей каждого из звеньев крыла, обеспечивающих максимальную подъёмную силу, а следовательно, и максимальную скорость взлёта. Средства визуализации результатов моделирования программы Simulink/SimMechanics позволяют наглядно получать трёхмерную анимационную картину полёта исследуемого робота-орнитоопера в пространстве.

В дальнейшем планируется компьютерную модель динамики орнитоопера дополнить моделью электроприводов и моделью системы автоматического управления.

Использование разработанной компьютерной модели робота-махолёта позволяет оптимизировать параметры конструкции летательного аппарата, наиболее эффективно выбирать его приводы, воссоздавая принципы движения его бионического аналога – чайки.

<sup>а</sup> Юго-Западный государственный университет

Бабин А.Ю.<sup>a</sup>

## О проектировании активных мехатронных гибридных опор роторов

Развитие инженерных решений в области создания интеллектуальных опор роторов ведется в трех основных направлениях: исследование возможности конструктивной модернизации опорной поверхности подшипников (мехатронные подшипники с подвижными или упругими элементами), исследование возможности управления параметрами смазочных материалов путем внедрения специальных добавок (ферромагнитные жидкости в подшипниках и демпферах) и исследования мехатронных гибридных подшипников, в которых управление осуществляется за счет изменения давления подачи смазочного материала в зону трения (мехатронные гидростатодинамические опоры). То или иное направление связано с решением комплексной задачи обеспечения адекватного режима функционирования подшипников опорных узлов роторных машин и основывается, прежде всего, на анализе условий работы конкретной машины. Эта задача также включает в себя разработку оптимального с точки зрения геометрии роторно-опорного узла и проектирование системы управления. Так как опоры скольжения являются уникальными для каждой конкретной машины, выбор принципа управления, моделирование работы системы управления и оценка ее влияния на работу роторно-опорного узла, подбор элементной базы системы управления представляется также по сути комплексной задачей.

В настоящем докладе рассматриваются общие вопросы проектирования мехатронных гибридных опор высокоскоростных роторных машин. Влияние рабочих и теплофизических параметров рабочего узла и конструктивных особенностей конкретных машин представлены на примере активных гибридных опор. Показано влияние системы управления, основанной на применении электрогидравлических актуаторов, на работу роторно-опорного узла, и описаны общие проблемы, возникающие при проектировании мехатронных опор. Описана элементная база экспериментального стенда для исследования радиальных и упорных мехатронных опор роторов.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Петрешин Д.И., Акулов П.А.<sup>b</sup>

## Мехатронная система тестирования электрических соединителей

**Актуальность.** В настоящий момент процесс тестирования механических свойств электрических соединителей проходит вручную. Тестирование силы сочленения и расчленения контакта электрического соединителя выполняется в ручную с использованием модифицированной гирьки и ответной части разъема, что дает весьма субъективные результаты, т.е. невозможно получить информацию о реальном значении силы сочленения и расчленения контакта.

**Постановка задачи.** Необходимо измерить силу сочленения и расчленения электрического соединителя имеющего n-розеток.

**Решение задачи.** Для измерения силы сочленения и расчленения электрического соединителя используем датчик силы с закрепленной на нем ответной частью штырь-калибром. Эта ответная часть может быть съемной для возможности одной измерительной установкой осуществить измерения различных типов соединителей. Штырь-калибр должен протестировать все n-розеток соединителя. В таком случае измерительная установка будет представлять собой мехатронную систему, обеспечивающую перемещение датчика силы со штырь-калибром по трем

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Брянский государственный технический университет



координатам по заданной программе. Программа перемещения будет определяться типом контролируемого соединителя.

Перемещение по оси X обеспечивает переход от одного контакта к другому в ряду, перемещение по оси Y обеспечивает переход между рядами (их может быть больше двух). Перемещение по осям X и Y является установочным и выполняется с точностью  $\pm 0,01$  мм. Перемещение в вертикальной плоскости (ось Z) обеспечивает измерение силы, которую необходимо приложить для сочленения и расчленения розетки с контрольным штырь-калибром. Сигнал с датчика позволяет блоку управления принимать решение о продолжении перемещения щупа или останавливать его перемещение в том случае, если фиксируется перегрузка датчика усилия (попадание посторонних предметов, остатки материала корпуса, деформация контакта в разъеме при его некачественной сборке).

Для управления процессом тестирования используется специально разработанная микропроцессорная система, имеющая HMI. Это позволяет визуализировать весь процесс тестирования и оперативно изменять управляющую программу при переходе на другой тип электрического соединителя.

Выводы. Испытания опытного образца мехатронной системы тестирования электрических соединителей показали значительное сокращение трудоемкости данной операции. Впервые были получены реальные значения силы и осциллограммы процесса сочленения и расчленения электрических соединителей.

Волков А.А.<sup>a</sup>, Бучко И.А.<sup>b</sup>, Махова Н.Н.<sup>c</sup>

## Динамический анализ и синтез роторных агрегатов с переменными инерционными свойствами

Инерционные свойства роторов связаны с динамической и моментной неуравновешенностью, гироскопическими эффектами, неустановившимися режимами функционирования. В отдельных случаях изменение моментов инерции связано со структурной адаптацией опорных, уплотнительных и демпферных устройств, наличием систем обратных связей, а также с изменением массы вращающихся элементов в процессе работы в микроструктурных средах.

К настоящему времени вопросы динамического поведения роторов, связанные с изменением дисбаланса и массы, остаются малоизученными и недостаточно проработанными в теоретическом плане. Это обуславливает актуальность изучения динамики несбалансированных роторов переменной массы на подшипниках жидкостного трения.

В рамках решения данной задачи разработана математическая модель расчета динамических характеристик ротора на подшипниках жидкостного трения с учетом изменения массогабаритных и инерционных характеристик, основанная на совместном решении уравнений движения, гидромеханики и термодинамики, позволяющая производить анализ динамического поведения несбалансированного ротора переменной массы, выбирать рациональные параметры подшипников жидкостного трения. Установлены закономерности движения несбалансированного ротора переменной массы на подшипниках жидкостного трения, позволяющие выявить условия возникновения и развития в системе устойчивых предельных циклов, и предложены рекомендации по выбору предельных режимов работы агрегатов с роторами переменной массы и дисбалансов, позволяющих снизить негативное влияние изменения инерционных характеристик ротора на работу опорного узла. Помимо этого разработаны алгоритм и инструментальные средства проектирования роторных систем с подшипниками жидкостного трения, работающие в условиях изменения массогабаритных и инерционных характеристик ротора, позволяющие

<sup>a</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

<sup>b</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

<sup>c</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

автоматизировать инженерный расчет как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации.

Поскольку структура подобных несбалансированных роторных систем существенно усложняется такими факторами, как наличие неизмеряемых и случайных возмущений, а также присутствием ненаблюдаемых состояний объекта, перспективным может оказаться применение методов адаптивного управления, основанных на идентификации системы.

**Климов В.Е.<sup>а</sup>**

## **Мехатронный подход при разработке структуры горнопроходческого комплекса**

Постановка проблемы и описание научной задачи.

Решение задач в горной отрасли и в смежных с ней направлениях проведения подземной проходки и строительства, на современном этапе горного производства возможно на основе широкого внедрения прогрессивной технологии, базирующейся на использовании техники нового поколения. К такой технике можно отнести мобильные автономные породоразрушающие проходческие комплексы.

Комбайновый способ проведения выработок является наиболее распространенным и прогрессивным, так как позволяет совместить во времени тяжелые и трудоемкие операции по разрушению забоя и уборке из него горной массы. Кроме того, при комбайновом способе проведения выработок существенно повышается устойчивость последних, так как монолитность пород в массиве нарушается в меньшей степени, чем при буровзрывных работах.

Перспективным направлением, расширяющим область применения механических способов для разрушения пород средней и выше средней крепости, является ударный способ, реализуемый с помощью силовой импульсной системы и компактных гидравлических устройств. В России остается открытым вопрос по созданию технологической базы для производства проходческих машин по крепким породам.

Внедрения автономных горнодобывающих проходческих машин, транспортного и погрузочного оборудования с дистанционным управлением значительно снизит последствия от непредвиденных катастроф (внезапные выбросы метана) в горнодобывающей отрасли. На данный момент уже существует ряд работ направленных на внедрение подобного рода импульсных технологий при проведении горной выработки.

Применение мехатронных систем в горнопромышленном машиностроении.

Согласно мехатронному подходу, структурную схему горнопроходческого комплекса возможно представить состоящей из четырех подсистем (блоков), которые реализуют соответственно четыре фундаментальные функции: управления, планирования, энергообеспечения, технологирования. Все элементы конструкции машины можно классифицировать на: исполнительные механизмы, силовые преобразователи энергии, передающие элементы, элементы управления. Каждый вновь разработанный модуль (мехатронный узел) системы должен включать в себя компьютерный блок управления с подконтрольными ему датчиками и индикаторами, посредством которого происходит обмен энергией, веществом и информацией между модулями, что обеспечит совместную функциональную взаимосвязь мехатронных узлов системы.

Процесс работы машины можно представить в следующем виде. Исходная программа определяет начальную организацию работы всей системы с последовательной активацией каждого мехатронного узла. В этом режиме закладываются основные параметры и свойства модулей в целом. Активизируется принцип управления по состоянию. Таким образом, функционирование комплекса осуществляется за счет работы компьютера (основного процессорного устройства) согласно вводным параметрам. Текущая самоорганизация системы

---

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

осуществляется на основе принципа ситуативного управления. Управление всеми системами происходит за счет логических преобразований с учетом анализа комплексных показателей с датчиков и индикаторов о состоянии энергомеханических систем (исполнительные механизмы, питатели, преобразователи) и основных параметров проходки выработки.

С целью реализации эффективного способа регулирования нагрузки электрогидромеханические модули и их приводные части выполнены регулируемы. Оператор задает параметры, необходимые к обработке, а закон регулирования проектируется компьютером согласно предварительно заложенной программе.

Основные выводы.

Классификация элементов конструкции и системное представление машины как мехатронного объекта позволяет учесть функциональную взаимосвязь элементов конструкции машины в процессе проектирования. Такое представление на данном этапе требует дальнейших исследований по следующим направлениям:

- проектирование сложных самоорганизующихся мехатронных систем (горнопроходческих комплексов) во взаимосвязи со средой применения;
- разработка требований к системам компьютерного управления горнопроходческими машинами;
- проектирование алгоритма управления и оптимизации рабочих процессов машины с учетом вариативности;
- создание математической модели функционирования системы компьютерного управления машиной и ее интеграция как функционально законченного элемента в комплексную математическую модель машины.

На текущий момент развитие гидравлических ударных устройств достигло достаточно высокого уровня, однако это не касается горнопроходческих комплексов, включающих в себя сразу несколько совместно работающих и усиливающих эффект друг от друга гидравлических ударных устройств.

Актуальным остается переход от силового резания горной породы дисками и шарошками к более эффективным технологиям производства скола породы пролонгированным силовым импульсом. Такой переход дает снижение удельных затрат энергии и металлоемкости конструкции машины. Применение планетарной конструктивно-кинематической схемы исполнительного органа расширит возможность последовательной обработки всей груды (по поверхности) забоя. Применение утилитарных генераторов механических импульсов с автоматической системой замены и подключения их к энергообеспечению позволит сократить время простоя в технологических операциях. Мехатронный подход позволяет сократить длину проходческого комбайна, что откроет возможность использования его в коротких технологических выработках, что способствует увеличению скорости технического обеспечения горных проходок.

Кирсанов Д.В., Горемыко М.В.<sup>а</sup>

## **Численный анализ конкурентных процессов в многослойной сети фазовых осцилляторов с использованием технологии параллельных вычислений CUDA**

Теория сложных сетей – это относительно новая, бурно развивающаяся междисциплинарная область знаний. Разработанный на данный момент инструментарий, алгоритмы и теоретические методы приближают ученых к решению многих задач, но несмотря на достижения последних двух десятилетий в этой области знания все более явной становится необходимость выхода за пределы привычной парадигмы для понимания более сложных явлений. Причина этого довольно проста – не существует систем, функционирующих полностью изолированно. Напротив, все они взаимосвязаны, и то, что происходит на одном уровне

<sup>а</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.



взаимодействия, влияет на структуру и динамику процессов на другом уровне – так многие реально существующие физические, социальные, биологические и инфраструктурные системы состоят из нескольких частей, взаимодействующих друг с другом. Выявление принципов взаимодействия между отдельными сетями, такими как кооперация и конкуренция, а также, изучение обратной связи между эволюцией структуры и динамикой сетей, представляется важной задачей, исследование которой позволит получить более целостное представление о процессах, протекающих в реальных системах.

Важным фактором, препятствующим численному анализу систем такой сложной топологии, является то, что для их моделирования требуются огромные вычислительные мощности. Для решения задач такого типа очень эффективно использовать GPU с ядрами архитектуры SIMD (одиночный поток команд, множество потоков данных). В то время как ядра CPU созданы для исполнения одного потока последовательных инструкций с максимальной производительностью, GPU проектируются для быстрого исполнения большого числа параллельно выполняемых потоков инструкций, что идеально подходит для рассматриваемых задач. В данной работе вычисление динамики всех элементов производилось на графическом сопроцессоре с помощью технологии NVidia CUDA, что позволило существенно увеличить вычислительную производительность.

В качестве исследуемой системы была рассмотрена многослойная сеть (multiplex network) динамических элементов, слои которой содержат идентичный набор узлов, но имеют различную топологию связей. Кроме того, структура данной сети была нестационарной и зависела от динамики элементов, эволюционируя согласно принципам аддитивности и гомеостаза. Взаимодействие между слоями исследуемой модели происходило по принципам конкуренции, приводящей к динамическому перераспределению связей внутри каждого слоя. В качестве элементов сети были рассмотрены фазовые осцилляторы Курамото.

С помощью разработанной модели была численно рассчитана динамика процессов конкуренции и синхронизации в многослойной сети осцилляторов при изменении управляющих параметров – времени адаптации между элементами и силы связи. Обнаружено что режимы глобальной синхронной динамики характеризуются возникновением идентичной топологии взаимодействующих слоев и однородным распределением связей внутри каждого слоя. При этом режимы частичной синхронизации и кластерной синхронизации приводят к появлению внутри слоев топологий, характеризующихся свойством свободного масштабирования и уникальных для каждого слоя.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (задания 3.861.2017/ПЧ и 3.4593.2017/ВУ).*

**Новиков А.Н., Фетисов А.С.<sup>а</sup>**

## **Мехатронные устройства автомобильного транспорта**

Современный автомобиль трудно представить без таких устройств, как ABS, ESP, система климатического контроля, система навигации и т.п. Многие устройства транспортных систем являются мехатронными системами. В классическом случае мехатронная система включает в себя информационные устройства, исполнительные механизмы, датчики различной природы и назначения, систему актуаторов и энергетическую систему. Исторический аспект применения новых систем в автомобиле напрямую связан с развитием новых технологий. 1. Простейшие автоматические системы. Инжекторные системы управления двигателем активно начали применяться в 1980-х годах. В классическом случае инжектор представляет собой мехатронную систему: объектом управления является двигатель. ЭБУ является информационным устройством, несущим программу управления. В системе также присутствуют датчики и исполнительные устройства в виде регуляторов. 2. Сложные системы управления различными

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

устройствами двигателя. Примером может служить роботизированная коробка передач, представляющая собой МКПП, сцеплением и выбором передач которой управляет специализированный блок управления посредством сервоприводов. Система климатического контроля автомобиля является классическим примером мехатронных систем, применяемых в транспортных системах. Климат-контроль управляет при помощи системы приводов потоками холодного воздуха кондиционирования и теплого воздуха отопительной системы автомобиля для достижения желаемой температуры. Также известным примером мехатронных устройств является адаптивная подвеска, позволяющая управлять режимами комфортности работы подвески, и адаптивное рулевое управление, позволяющее варьировать усилие на рулевом колесе и задержку. Система адаптивного круиз-контроля, являющаяся типичной мехатронной системой автомобиля, позволяет в автоматическом режиме управлять скоростью и положением колес на основании датчиков расстояния и положения. 3. Рототизированные и интеллектуальные системы. Подобные системы автомобиля в настоящее время являются открытой сферой исследований. Существуют прототипы беспилотных автомобилей различных фирм. Основной сложностью является наполнение управляющих устройств автомобилей информационными базами, позволяющими сделать беспилотные устройства безопасной заменой человеку.

Емельянова О.В., Поляков Р.Ю., Ефимов С.В., Яцун С.Ф.<sup>а</sup>

### **Мобильный летательный комплекс для раннего обнаружения очагов возгорания**

В последнее время ведущие страны мира активно разрабатывают, исследуют и используют беспилотные летательные комплексы (БЛК) для наблюдений, оценки и прогноза состояния окружающей среды с целью оперативной разведки местности в пожароопасный период, мониторинга лесных пожаров, а также обнаружения на ранних стадиях очагов возгорания. Такие комплексы оснащены датчиками и сенсорами, использующими активные и пассивные сигналы различной природы (световые, звуковые, инфракрасные и др.), предназначенные для обнаружения и детектирования элементов внешней среды.

Применение газочувствительных сенсоров-измерителей концентрации СО в системах БЛК позволяет обнаружить пожароопасную обстановку на ранней стадии, когда можно принять меры по остановке опасного процесса и предотвратить пожар. В качестве транспортной платформы особенно эффективными могут оказаться БЛК, позволяющие осуществлять вертикальный взлет, зависание над объектом, горизонтальный полет. Возрастание концентрации монооксида углерода является определяющим признаком для движения мобильной платформы в сторону источника возгорания. Предполагается, что газовый анализатор жестко устанавливается на корпусе. Также на корпусе установлен ультразвуковой дальномер определяющий расстояние до препятствия, информация с которого позволяет корректировать траекторию движения БЛК.

Направление движения БЛК определяется углом азимута, отсчитываемым от северного направления меридиана, и направлением на ориентир с максимальным содержанием СО в соответствии с симплекс-методом и методом Кифером-Волфовицем. Движение в пространстве начинается с использованием двумерных симплексов, а по мере приближения к источнику, предложено осуществлять поиск на основе планирования отрезков прямой, позволяющих двигаться в сторону увеличения концентрации СО с фиксацией одной из координат. Метод Кифера-Вольфовица отличается от обычного метода градиента тем, что при приближении к области экстремума фактический размер рабочего шага уменьшается в прямой зависимости от номера этого шага.

Для исследования динамики БЛК разработана математическая модель пространственного движения летающего робота на базе конвертоплана типа трикоптер, и получены основные математические выражения, определяющие движение объекта к источнику

<sup>а</sup> Юго-Западный государственный университет

возгорания. Особое внимание уделено вопросам поиска источника возгорания и планирования траектории движения к нему с учетом окружающей среды и препятствий.

Разработана структурная схема и алгоритмы управления движением БЛК по скорости и азимуту на  $i$ -том участке кусочно-линейной траектории на основе логического вывода, определения минимального и максимального значения концентрации монооксида углерода  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ , построении  $i$ -го фрагмента новой траектории в форме параметрических уравнений  $y_i(t)$ ,  $x_i(t)$ , где  $t$  – время. При приближении к источнику возгорания возрастает температура  $t^o$  окружающей среды, которую контролирует бортовой сенсор. Если выполняется условие, при котором  $t^o \geq t_0$ , где  $t_0$  – предельная температура, дальнейший полет в сторону источника возгорания прекращается.

В дальнейшем планируется провести моделирование движения БЛК по пространственной траектории с использованием средств визуализации с целью наглядного воссоздания принципов движения и управления БЛК с учетом адаптивных алгоритмов обработки данных датчиковой аппаратуры.

Поляков Р.Н., Грищенко Н.Е.<sup>а</sup>

## Многофункциональная реабилитационная кровать с 3Д-профилем опорной поверхности

В развитии современного машиностроения и медицины характерной тенденцией является увеличение показателей точности и снижение металлоемкости. Развитие техники сопровождается постоянным ростом требований, предъявляемых к техническим системам и их отдельным элементам, к которым можно отнести такие комплексные показатели, как надежность, энергоэффективность, долговечность, безопасность и т.д. Основным недостатком является наличие максимум семи плоскостей с ручным управлением, изменяющих угол наклона только в продольном направлении тела, что может являться фактом неполного контакта. Необходимость разработки многофункциональной реабилитационной кровати с 3Д-профилем опорной поверхности диктуется многообразием болезней и реабилитационных процедур, при которых пациенту требуется фиксация в определённом пространственном положении. Количество требуемых медицинских кроватей для среднестатистического медицинского учреждения может достигать сотни единиц. При этом применяемое оборудование имеет малое количество плоскостей регулировок и ручные приводы, что оправдывает себя за счет низкой цены, но имеет существенные ограничения по клиническим случаям.

Рационально разделение подвижных секций в зависимости от части тела человека и требуемой степени механического воздействия, что позволит достичь большего контакта с телом человека и позволит проводить необходимые процедуры для реабилитации. Также, для адаптации под индивидуальные особенности каждого человека предусмотрена оригинальная конструкция самоустанавливающегося шарнира, позволяющего принимать оптимальное положение в зависимости от позы больного. Данный продукт позволяет совместить аппараты механотерапии и реабилитационной кровати, что увеличивает его функциональность и применимость в лечебном процессе. За счет более гибкого программированного управления положения больного с использованием пульта дистанционного управления можно добиться большей самостоятельности тяжелобольных пациентов.

Внедрение инновационной реабилитационной кровати позволит повысить эффективность реабилитационных процедур предупреждения патологических процессов, приводящих к потере трудоспособности и инвалидности при различных видах тяжёлых заболеваний (тетраплегия, параплегия и др.) за счет точного позиционирования больных в процессе жизнедеятельности, снижения нагрузки на участки с максимальными болевыми

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

ощущениями путем равномерного распределения нагрузки на опорную поверхность, а также совмещения функций реабилитационной кровати и средств механотерапии.

Большое количество независимых приводов потребует применения методов сверхплотного монтажа элементов и оптимизации конструкции по максимально возможному числу параметров для снижения ее себестоимости и обеспечения конкурентоспособности.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Крашмалев Г.Н.<sup>a</sup>

## Методы калибровки инструмента промышленных роботов

Рассмотрены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку центра инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота. Калибровка инструмента выполняется при оснащении промышленного робота новым инструментом. Первый этап калибровки состоит в определении центра инструмента (TCP – Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в TCP. В настоящем докладе представлены исследования, соответствующие методам проведения первого этапа калибровки инструмента. Рассмотрены методы, распространённые в практике эксплуатации промышленных роботов. Представленные в докладе результаты могут быть использованы при разработке программно-математического обеспечения систем управления промышленными роботами.

Шутин Д.В., Токмаков Н.В., Горина М.А.<sup>b</sup>

## Анализ элементов питания страхующих мехатронных устройств

Страхующие мехатронные устройства предназначены для обеспечения безопасности прыжков с парашютом или управляемого раскрытия парашюта при десантировании грузов.

Страхующее мехатронное устройство представляет собой прибор, состоящий из следующих основных элементов: вычислительного модуля с панелью управления, устройства разрушения петли зачековки парашюта и блока питания.

Постоянную и стабильную работу страхующего прибора обеспечивает блок питания. В основу блока питания положена комбинация из первичных (батарей) и вторичных (аккумуляторов). Для бесперебойной работы элементы блока питания должны удовлетворять следующим требованиям: 1) большая емкость; 2) длительное время сохранения заряда; 3) высокий диапазон температур применения; 4) маленькие габариты; 5) герметичность корпуса элементов питания.

Были подвергнуты анализу основные типы элементов питания первого рода (батарей): солевые, щелочные, литиевые и элементы питания второго рода (аккумуляторы): никель-кадмиевые, никель-металлогидридные, литий-ионные, литий-полимерные.

В результате учета всех вышеперечисленных требований, анализа типов батарей и аккумуляторов возможно сделать следующие выводы:

1) в роли первичного элемента питания страхующего мехатронного устройства целесообразнее применять литий-тионилхлоридные батареи;

2) в роли вторичного элемента наиболее подходящими являются литий-полимерные аккумуляторы.

<sup>a</sup> Брянский государственный технический университет

<sup>b</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Козырев Д.Л., Горин А.В.<sup>a</sup>

## Мехатронная система виброзащиты

При работе автотранспорта неизбежно возникают колебательные процессы. Вибрации возникают как под действием внешних сил, приложенных к системе, так и под действием диссипативных сил, возникающих со стороны дорожного полотна. Вибрации оказывают, как правило, негативный эффект на функционирование механической системы. Это проявляется в увеличенном износе, нагреве деталей, снижении точности позиционирования, уменьшении КПД, увеличении уровня шума. При этом защита водителя от воздействия низкочастотных вибраций представляет весьма важный и актуальный вопрос, которому последнее время уделяется пристальное внимание.

Предложена схема устройства мехатронной рычажной релаксационной подвески с управляемым демпфером сухого трения. Также предложена математическая модель работы мехатронной рычажной релаксационной подвески, позволяющая по фазовым траекториям оценить виброзащитные свойства в зависимости от параметров подвески и входных вибраций, вызванных неровностями дорожного полотна. В результате численного эксперимента, проведенного в среде Matlab, были получены фазовые траектории для различных условий и осуществлен поиск оптимальных параметров подвески.

Введение управляемого демпфирования позволяет рассматривать подвеску как мехатронную систему и требует применения методик проектирования мехатронных систем. Применение управления позволяет мехатронной рычажной релаксационной подвеске самоадаптироваться к изменяющимся параметрам дорожного полотна.

Также для сравнения теоретических и экспериментальных результатов был спроектирован и выполнен тестовый стенд, который показал хорошую сходимость результатов.

Вышеперечисленное дает возможность сделать следующие выводы:

- предложенная конструкция мехатронной рычажной релаксационной подвески компактна и позволяет использовать ее в различных по габаритам транспортных средствах;
- применение рычажной конструкции позволяет снизить массу подвески;
- применение мехатронной рычажной релаксационной подвески более эффективно при низкочастотных воздействиях, что важно для защиты водителя и пассажиров;
- использование управляемого демпфирования позволяет подвеске адаптироваться к изменяющимся внешним условиям, что важно на проселочных дорогах.

Яцун С.Ф., Барыбин А.А., Лушников Б.В., Политов Е.Н.<sup>b</sup>

## Моделирование рыбоподобного робота в среде Matlab/Simulink/SimMechanics

Малогобаритные автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) все активнее используются при разведке ресурсов, мониторинга технического состояния других подводных объектов, гидросферы, а также при проведении аварийно-спасательных работ. Среди таких аппаратов определенными преимуществами обладают рыбоподобные роботы, использующие бионические принципы движения: скрытность, бесшумность и маневренность при перемещении.

В качестве объекта исследования принята конструкция, состоящая из трех тел (корпус, предхвостие, хвостовой плавник), соединенных электроприводами, и реализующая окунеподобный стиль плавания. Механизм привода хвостового плавника представляет собой кривошипно-коромысловый механизм. Движение робота происходит благодаря силе тяги, возникающей при колебательном движении хвостового плавника. Поворот робота в горизонтальной плоскости

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Юго-Западный государственный университет



происходит за счет управления предхвостием. Погружение или всплытие робота-рыбы обеспечивается за счет изменения угла наклона боковых плавников (динамический режим) или за счет управления силой Архимеда.

Математическая модель рассматриваемого аппарата построена и реализована средствами блочного имитационного моделирования Simulink/SimMechanics пакета Matlab. Компьютерная программа прошла проверку на адекватность, доказавшую приемлемость получаемых результатов моделирования.

Программа обеспечивает возможность задания различных управляющих параметров робота: частоты колебаний хвостового плавника, углов поворота предхвостия и боковых плавников, а также задание значения силы Архимеда. В качестве исследуемых параметров возможно получение относительных и абсолютных кинематических характеристик звеньев робота, построение пространственной траектории центра масс робота, годографа вектора силы тяги, приложенной к хвостовому плавнику. Также программа позволяет определить требуемую мощность электроприводов, обеспечивающих заданные законы движения. Разработанная модель позволяет визуализировать движение моделируемого объекта за счет анимационных возможностей, обеспечиваемых пакетом Matlab/SimMechanics.

При компьютерном моделировании особый интерес представляет исследование влияния частоты колебаний хвостового плавника на тяговую силу, а следовательно, на значение средней скорости движения центра масс робота. Характер этой зависимости имеет вид кривой «насыщения», что вызвано увеличением силы вязкого сопротивления, которая пропорциональна скорости движения робота.

Значения различных констант уравнений и коэффициентов сопротивлений должны быть найдены для каждой модели индивидуально, исходя из конструктивных особенностей робота, а также различных условий эксплуатации реального объекта.

Программа может быть использована для оптимизации параметров конструкции, приводов робота и его системы управления по различным критериям качества при проектировании автономного обитаемого подводного аппарата, основанного на бионических принципах движения.

**Селихов А.В., Мишин В.В., Подмастерьев К.В.<sup>a</sup>**

## **Повышение эффективности диагностирования мехатронных систем**

### **Введение**

Мехатронные системы, машины являются сложным изделием, состоящим не только из электронных компонентов, но и механических узлов. Одной из задач машиностроительной области является обеспечение эксплуатационной надежности. Для её решения проводится изготовление узлов и деталей с повышенными показателями надёжности, оптимизируются режимы эксплуатации, а также совершенствуются методы диагностирования.

Неотъемлемым элементом подвижных систем стали подшипниковые узлы. При монтаже подшипника в узел опоры, изготовлении возможно изменение геометрических параметров, что приведёт к неблагоприятному распределению нагрузки между телами качения, создаст дополнительные вибрации, биения, изменения условий смазывания, что может значительно снизить долговечность подшипникового узла. Внедрение новых методов диагностирования позволит повысить надежность механизмов.

### **Основная часть**

Одним из перспективных методов диагностирования является электрорезистивный. Он отличается высоким быстродействием, большей информативностью по сравнению с вибрационным, акустическим методами, позволяет выявить дефект на ранней стадии.

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Недостатком существующих электрорезистивных методов является влияние трибо- и термоЭДС в зоне трения на результат измерения, так как они используют закон Ома для преобразования электрического сопротивления подшипника в диагностический сигнал, что в условиях производства может вносить существенную погрешность и требует лабораторных условий проведения диагностирования. Предлагаемый метод основан на использовании фазового фильтра в качестве первичного преобразователя, в обратную связь которого будет включен подшипниковый узел. Разность фаз между входным гармоническим сигналом и выходным будет определяться значением электрического сопротивления. С помощью фазового детектора полученная величина преобразуется в сигнал, удобный для передачи и хранения. Гармонический сигнал имеет частоту 10 МГц, в то время как сигнал трибо- и термоЭДС ограничен значением 1 МГц, используя полосовой фильтр возможно выделить полезный сигнал, существенно снизив влияние паразитного ЭДС. По сигналу сопротивления вычисляется параметр нормированного интегрального времени микроконтактирования, который позволяет оценить режим трения в опоре.

Метод позволяет диагностировать как одноопорные узлы трения, так и двухопорные. В этом случае суммарное электрическое сопротивление будет стремиться к меньшему из значений, так как они электрически соединены параллельно. Меньшим сопротивлением обладает подшипник с худшим техническим состоянием. Таким образом можно выявить наличие дефектного подшипника в двухопорном узле трения.

#### Заключение

Представлен метод диагностирования, позволяющий решить задачу повышения эксплуатационной надёжности путём увеличения эффективности диагностирования подшипниковых узлов при наличии паразитного ЭДС в зоне трения; определения наличия дефектного подшипника в двухопорном узле трения.

Усикова И.Г.<sup>а</sup>

## Мехатронные технологии в системе «Умный дом»

В настоящее время интеллектуальные и мехатронные технологии находят применение во многих областях, в том числе и в строительстве. В производственных и жилых помещениях всё большее распространение получают автоматизированные системы управления отдельными функциями. Можно констатировать внедрение категории «Умный дом» в терминологию строительных организаций.

«Умный дом» представляет собой сложную систему, которая позволяет объединить разнообразные устройства в единое целое, а также осуществляет контроль и управление всеми инженерными системами, при этом обеспечивая функциональность, экономию и комфорт проживания.

Структура управления включает в себя следующие системы: климатические, диспетчеризации, управление освещением, контроля аварийных ситуаций, вентиляции и кондиционирования, видеонаблюдения, а также систем безопасности.

Применение мехатронных технологий в системах «Умный дом» позволит автоматизировать некоторые системы, улучшая комфорт проживания, обеспечивая экономичность, а также уменьшая человеческий фактор. Например, мехатронная система управления светом позволит автоматически осуществлять контроль и управление освещением, для этого необходимо лишь задать нужные условия.

Интегрирование функций отдельных подсистем в автоматизированную систему управления предполагает разработку основных и дополнительных требований. основополагающими категориями функционирования «Умных домов» являются: безопасность использования, энергоэффективность, конфиденциальность, экономичность. Также к подсистемам предъявляются дополнительные требования, характерные для её использования. Например,

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

мехатронная система «Умное окно» предназначена для открытия/закрытия окон в доме. Основными требованиями является: обеспечение электромеханической безопасности; противопожарной безопасности; должна обеспечиваться малая энергоемкость; должна срабатывать только по системе распознавания голоса хозяина. К дополнительным требованиям данной системы относятся: шумоизоляция, изменение светопропускаемости, а также герметичность соединений.

В результате анализа систем «Умный дом» выявлено, что мехатронные технологии способствуют улучшению эффективности работы его подсистем.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Поляков Р.Н., Марахин Н.А.<sup>а</sup>

### **Экспериментальная установка по исследованию динамики ротора на АМП**

В современных газотурбинных и других роторных агрегатах, как правило, ведутся улучшения в направлении увеличения частоты вращения вала. Все чаще возникают ситуации, когда ни подшипники качения (ПК), ни подшипники скольжения (ПС) не могут обеспечить требуемых эксплуатационных характеристик в силу своих недостатков:

- для ПК: наличие механического контакта между подвижными и неподвижными частями, что приводит к снижению долговечности; ограниченная быстроходность, высокая чувствительность к вибрационным и ударным нагрузкам, малое демпфирование колебаний, повышенный шум;

- для ПС: износ на режимах пуска и останова, неустойчивость движения вала, необходимость в наличии системы подачи смазки.

Активные магнитные опоры (АМП) лишены этих недостатков, их предельная быстроходность зависит только от прочности материала цапфы на разрыв, они имеют высокий показатель устойчивости, так как электронное управление позволяет активно гасить нежелательные колебания ротора. Однако отсюда вытекает основная проблема АМП – это сложность системы управления и ограничения по области режимов работы (для разных частот вращения работы требуется свой набор коэффициентов регулятора). Внедрение адаптивных алгоритмов управления, в том числе на базе нейронных сетей, позволит расширить границы применимости и области устойчивой работы. При этом для проверки разрабатываемых алгоритмов необходима экспериментальная установка с широкими диапазонами регулирования по частоте вращения и большой вариабельностью управляющих параметров.

В рамках выпускной квалификационной работы авторами проектируется экспериментальная установка, включающая в себя: высокоскоростной электродвигатель, совмещенный с валом для исключения проблем несоосности; два радиальных АМП, один осевой двусторонний АМП, а также страховочную систему на базе подшипников качения. Еще одной особенностью экспериментальной установки является монтажная система испытуемого модуля, включающая в себя прецизионные направляющие и установочные призмы 6-класса точности, что позволяет использовать монтажную систему для проведения экспериментальных исследований роторных систем различной структуры и габаритных размеров.

В соответствии с форматом обучения СДИО планируется создание опытного образца экспериментальной установки и внедрение его в научно-исследовательский процесс на базе ПНИЛ «Моделирование гидромеханических систем».

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева



Сытин А.В.<sup>а</sup>

## Мехатронные опоры роторов с упругими элементами

Современным требованиям повышения удельной мощности турбоагрегатов энергетического и транспортного машиностроения, производительности прецизионного оборудования при сохранении и, даже, уменьшении массогабаритных характеристик соответствует значительный рост частот вращения роторов. При этом возникают новые проблемы, связанные непосредственно с переходом роторно-опорной системы через критические частоты и работы в закритических областях. Наибольшее распространение в данных системах получили подшипники скольжения с упруго-податливыми поверхностями, при этом, диссипация энергии колебаний на основе конструкционного демпфирования предполагает предварительный расчет и настройку комплекта упругих элементов на определенные значения нагрузок, частот вращения, температур, а также возможного внешнего воздействия, что позволяет создать адаптивную опору, работающую в определенном диапазоне параметров. Непредвиденные ситуации, неточности расчета и подбора упругих элементов приводят к выходу из строя опорного узла с возможным разрушением рабочих колес и возникновением серьезных аварийных ситуаций.

Внедрение в опорный узел систем контроля, прогнозирования, а также управления конструктивными и энергетическими параметрами с минимально возможной задержкой позволяет избежать аварийных ситуаций, расширяя диапазон адаптации данного класса опор. Конструктивные особенности упруго-податливых подшипников предполагают возможность размещения мехатронных модулей движения непосредственно в опоре, обеспечивая смещение креплений упругих элементов в радиальном и осевом направлении, варьируя жесткостью опорной поверхности при изменении прогиба в пределах упругих перемещений. Использование электромагнитных устройств в данных конструкциях дает возможность бесконтактного воздействия на управляемые параметры, что является необходимым условием для обеспечения герметичности в вакуумной технике. Перспективным направлением является изготовление упругих элементов из новых материалов с памятью формы, а также многослойных конструкций с применением биморфных пьезокерамических элементов, которые могут работать в качестве датчиков прогиба (на основании прямого пьезоэлектрического эффекта) и в пьезоэлектрических актуаторах (обратный пьезоэлектрический эффект). В случае отключения питания упруго-податливые опоры не теряют своей работоспособности, что значительно повышает надежность и ресурс роторно-опорного узла и всей машины в целом.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Родичев А.Ю.<sup>б</sup>

## Технологические аспекты в трибомехатронике

В развитии современного машиностроения, авиации и аэрокосмической техники характерной тенденцией является усложнение геометрических форм деталей, снижение их металлоемкости при одновременном повышении параметров точности. Постоянное развитие техники обуславливает ужесточение предъявляемых к техническим системам и их отдельным элементам требований, к которым можно отнести такие комплексные показатели, как надежность, энергоэффективность, долговечность, безопасность и т.д. Изготовление деталей сложной геометрии, получивших название многоэлементных, на универсальных станках неэффективно и малопроизводительно, требует больших затрат и сопряжено с вероятностью получения брака.

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>б</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Такие детали могут быть эффективно изготовлены на современных многоцелевых обрабатывающих центрах по новым технологиям.

Для роторных машин и агрегатов соответствие указанным требованиям во многом определяется характеристиками применяемых опорных узлов. В большинстве случаев они являются критическими элементами роторных систем, поскольку во многом определяют такие их свойства, как виброустойчивость, долговечность, ремонтпригодность, поэтому совершенствование роторных машин невозможно без совершенствования опор роторов. Наиболее актуальным и перспективным направлением развития опорных узлов является внедрение в них активного управления, что позволяет вывести показатели их функционирования на принципиально новый уровень. Но внедрение таких систем невозможно без реализации новых технологий и применения современных обрабатывающих комплексов и инструмента. Для разработки и реализации новых технологий необходимо учесть, как влияют различные факторы на работоспособность узлов и сборочных единиц. Одним из таких примеров является износ рабочих поверхностей подшипника скольжения, следствием которого мог стать ряд факторов: неправильный подбор материала вала и подшипника; недостаточная твердость поверхности вала; неправильное соотношение между твердостью вала и подшипника; неправильная макро- и микрогеометрия несущих поверхностей; низкое качество масла; окисление масла в эксплуатации; неудовлетворительная фильтрация масла от механических примесей и твердых продуктов окисления.

Анализ конструкций и технических требований на функционально важные узлы изделий современной техники обуславливает необходимость разработки новых эффективных технологий их изготовления. Одной из которых является моделирование технологических операций изготовления деталей на многоцелевых станках с применением 3D-модели детали и заготовки позволяет выявить состав технологических переходов, необходимую инструментальную оснастку, режимы обработки и получить управляющую программу для выбранной системы ЧПУ. При этом достигается минимизация влияния погрешности установки, что обеспечивает высокую точность операционных размеров и уменьшение числа звеньев технологических размерных цепей.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Горин А.В., Кравченко В.А., Горина М.А.<sup>а</sup>

## **Мехатронные механизмы на основе импульсного гидропневматического привода при бестраншейной прокладке трубопроводов**

Строительство подземных трубопроводов открытым (траншейным) способом в условиях города, а также при пересечении железных и автомобильных дорог сопряжено с определенными трудностями: необходимостью разборки, а затем восстановлением дорожных покрытий; нарушением движения транспорта; загрязнением окружающей среды. Открытое строительство трубопроводов практически невозможно под зданиями и сооружениями.

Наше внимание сосредоточено на бестраншейном строительстве трубопроводов в условиях населённых пунктов, пересечения дорог, т.е. небольшой протяжённости, но в существенно осложнённых и ограниченных условиях.

В настоящее время имеется достаточно много различных машин для бестраншейного строительства коммуникаций, в состав которых входят мехатронные механизмы, их эффективность во многом зависит от правильно выбранных конструктивных и технических параметров.

Анализ конструктивных схем мехатронных механизмов для бестраншейного строительства трубопроводов в грунтах показывает, что основными составными частями их

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

являются напорный механизм (Н) и инструмент (И). Они могут иметь кинематические (+) и конструктивные (·) связи. Базовой формулой, описывающей процесс проведения скважин, является Н+И.

Формула мехатронных механизмов, наиболее эффективных для бестраншейного строительства трубопроводов с использованием гидравлических ударных устройств имеет вид:

$$\begin{array}{c} \text{П} \rightarrow \text{У} + (\text{И} \cdot \text{Н}) \leftarrow \text{П} \\ \uparrow \quad \text{СУ} \quad \uparrow \end{array}$$

Таким образом, представленная схема предполагает кроме статической нагрузки, передаваемой инструменту через трубу, динамическое приложение нагрузки от гидравлического ударного механизма, которое отслеживается и управляется в зависимости от требуемых параметров проходки.

Шутин Д.В., Романов В.В., Стебаков И.Н.<sup>а</sup>

### Роботизированный комплекс для кладки из блочных материалов

Особенностью современной строительной отрасли является низкая степень автоматизации базовых технологических процессов. Так, для формирования кладки из блочных материалов используется полностью ручной труд. Применение средств автоматизации позволяет добиться снижения непосредственных временных и финансовых затрат. Перспективной разработкой является автономный роботизированный комплекс для автоматизированной кладки из блочных материалов.

Аналогичные по назначению решения представлены несколькими разработками из США, Австралии и России. При этом они отличаются узкой специализацией, неполной автоматизацией процесса кладки и высокой стоимостью. Задание технических характеристик проектируемого комплекса осуществлялось с учетом анализа недостатков решений-аналогов. Так, конструктивной особенностью нового робототехнического комплекса является модульная конструкция, спроектированная с учетом необходимости оперативного (не более 3 часов) развертывания и переналадки комплекса на объекте. Разрабатываемые алгоритмы функционирования рабочего органа комплекса позволяют возводить без переналадки не только линейные элементы с различными типами кладки, но и углы, проемы, перевязки, а также иные, более сложные конструктивные формы. Повышение производительности комплекса относительно ближайших по конструктивному исполнению аналогов обеспечивается за счет распараллеливания основных технологических процессов кладки из блочных материалов, таких как: подача блока в зону укладки; нанесение раствора; непосредственная укладка блока.

Проектируемая конструкция комплекса включает в себя мобильную тележку на гусеничном ходу, установленный на ней 5-осевой манипулятор для перемещения и укладки блоков, систему нанесения раствора матричного типа, систему подачи блоков конвейерного типа. Система управления робототехническим комплексом включает в себя сенсорный блок на основе систем технического зрения и специализированных датчиков для ориентирования робота в пространстве, контроля параметров кладки и навигации комплекса. Программная часть комплекса включает в себя программное обеспечение, обеспечивающее как непосредственное выполнение технической системой функциональных задач по формированию кладки, а также программное обеспечение для взаимодействия с пользователем, позволяющее делать расчет параметров кладки, загружать исполняемые файлы в систему управления робототехническим комплексом и контролировать ход выполнения задач на объекте.

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Фетисов А.С.<sup>a</sup>

## Смазка мехатронных опор скольжения реомагнитными жидкостями

Применение автоматизации и интеллектуальных технологий к различным сферам машиностроения способствует образованию целого ряда технологических машин, а также агрегатов и частей механизмов. На стыке мехатроники, как инструмента автоматизации и интеллектуализации, и трибологии образовались такие прикладные направления, как биомехатроника, гермомехатроника и трибомехатроника. В трибологии продолжительное время известно применение ряда добавок, существенно влияющих на вязкостно-температурные свойства смазочных материалов. Подобными свойствами обладают примеси разветвленных полимеров и нанодобавки. Неньютоновские свойства также проявляют реомагнитные жидкости под действием магнитного поля. Механизм взаимодействия магнитного поля и течения магнитореологической жидкости состоит в увеличении сдвиговых напряжений вследствие выстраивания металлических частиц, входящих в состав смазочного материала, вдоль линий магнитного поля. В данный класс полуактивных жидкостей помимо реомагнитных смазочных материалов также входят электрореологические жидкости. Данная особенность магнитных жидкостей является основополагающим принципом функционирования магнитореологических демпферов (а также магнитореологических амортизаторов). Существует возможность применения реомагнитных жидкостей в качестве смазочного материала в опорах скольжения с активным управлением. Отличительной особенностью подобных конструкций является наличие устройства, индуцирующего магнитное поле и позволяющего варьировать величину напряженности магнитного поля в необходимой области опоры скольжения. Существует возможность обоснования энергоэффективных режимов работы подшипникового узла при смазке реомагнитными жидкостями.

Можно констатировать факт наличия большого количества научных работ по данной тематике, в которых исследуются статические и динамические характеристики подшипников скольжения. Недостаточная освещенность в вопросах верификации с экспериментальными исследованиями связана прежде всего с трудностями планирования и проведения экспериментальных исследований, а также обработки данных в связи с большим количеством дрейфующих параметров, что влияет на достоверность результатов. Таким образом, анализ работ в данной области позволяет сказать о том, что вопросы влияния дополнительных сдвиговых напряжений, возникающих в зазоре подшипника мехатронной опоры скольжения, в настоящее время являются новыми и недостаточно изученными.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общинженерной подготовки».*

Колпакова С.В., Горин А.В., Юрьев Д.А.<sup>b</sup>

## Мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода и влияние их на базовую машину

Мехатронные механизмы на основе импульсного гидравлического привода (ранее представляемы как гидромолоты) в отличие от других видов сменных рабочих органов являются активным типом оборудования, которое оказывает динамическое воздействие на базовую машину. В свою очередь базовая машина с мехатронным механизмом на основе импульсного гидравлического привода представляет собой колебательную систему нескольких масс (масса молота, рукоятки, стрелы и др.), имеющих шарнирные сочленения и упругие элементы, в том числе гидроцилиндры. Во время работы импульсного мехатронного механизма на машину действует

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

знакопеременная сила, направленная вдоль продольной оси гидромолота, обусловленная возвратно-поступательным движением бойка.

Ещё одной негативной составляющей при работе базовой машины с импульсным механизмом являются так называемые «падения» базовых машин во время работы. Это связано с тем, что для уравнивания реактивной силы, возникающей при движении бойка, мехатронный импульсный механизм необходимо прижимать к объекту работы с помощью гидроцилиндров привода рабочего оборудования базовой машины.

На данный момент применяется ряд структурных схем взаимодействия импульсного мехатронного механизма на базовую машину. Однако у каждой из них имеются как положительные, так и негативные стороны.

Вышесказанное позволяет сделать следующие выводы:

Снижение силового воздействия работы мехатронного механизма на основе импульсного гидропривода на базовую машину является актуальным.

Иностранцы и отечественные разработчики гидромолотов применяют ряд мер по снижению динамических и вибрационных нагрузок на базовую машину, но они не имеют систематизированного и научно-обоснованного подхода. Это диктует необходимость выполнить анализ демпфирующих механизмов, применяемых в дорожной и строительной технике, для выбора рационального устройства и структурной схемы его взаимодействия с базовой машиной.

**Внуков А.В., Бычков М.В., Сметанин Д.Н.<sup>а</sup>**

## **Мехатронные устройства гермотехники и роторных машин**

Можно констатировать проникновение мехатронных и интеллектуальных технологий в различные сферы науки и техники помимо робототехники, ракетно-космической сферы, авиации. В военной технике наблюдается тенденция применения информационных и интеллектуальных технологий в медицинском оборудовании, строительстве, полиграфических и бытовых устройствах. Роторные агрегаты (насосы, компрессоры, движители, детандеры, мультипликаторы, вариаторы и т.д.) не стали исключением и также становятся объектами использования автоматизированной диагностики и активного управления. В первую очередь это относится к подшипниковым узлам, уплотнениям, направляющим устройствам гидродинамических и гидростатических трактов. В настоящее время в роторных агрегатах используют различные виды радиальных и торцевых, контактных и бесконтактных уплотнений.

Широкое применение в роторных машинах находят контактные и бесконтактные уплотнения. Каждый класс уплотнений не в полной степени отвечает поставленным требованиям, поэтому сужается область применения одних уплотнений и расширяется область других. Анализ различных источников позволяет сделать вывод о том, что даже бесконтактные уплотнения имеют свои определенные недостатки, связанные с устойчивостью ротора. Развитие мехатронных технологий и их интеграция в роторные агрегаты позволяют выйти на новый уровень не только в герметизации узлов, но и внедрить активное управление, приводя к новому классу – мехатронные уплотнения. К таким устройствам будут относиться уплотнения с использованием сенсорной системы, включающей в себя различные виды датчиков расхода, давления (калориметрические, дифференциальные, вихревые, ультразвуковые и др.). Исполнительная система, состоящая из электромеханических, электромагнитных устройств (пьезоактуаторы, магниты и т.д.), отвечает за изменение расходных, силовых и динамических характеристик, а также их корректировку.

Развивающимся направлением в гермотехнике является использование магнитожидкостных уплотнений, состоящих из двух совместных рядов кольцевых магнитов с аксиальной и встречной намагниченностью. Их суммарный магнитный поток создает замкнутый контур, пронизывающий рабочий зазор, не давая вытекать магнитной жидкости, препятствующей износу вала, между подвижными и неподвижными элементами.

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева



Мехатронные уплотнения роторных систем позволяют получать новые свойства, которые были недостижимы при использовании традиционных пассивных систем, позволяя производить целенаправленную корректировку параметров даже при выходе системы из расчетных режимов работы.

Чечина А.В.<sup>а</sup>

## **Вопросы планирования траекторий движения мобильных роботов с колёсным приводом**

Одной из важных задач управления мобильными роботами является операция планирования движения, которая заключается в предварительном формировании оптимальных или более реально рациональных траекторий. В качестве критериев оптимизации используют параметры снижение интервала времени прохождения и длины пути, минимизацию отклонений и дискретность траектории. Дополнительными факторами для рассмотрения могут служить безопасность движения объекта, эффективность выполнения поставленной задачи, показатели эффективности и многие другие. Стоит отметить, что ограничения по производительности или изменения требований к оптимальности получаемых траекторий приводят к трудоёмким предварительным расчётам траекторий. Сложность выбора траекторий заключается в том, что на пути у робота, как и других мобильных средств, могут появиться не только неподвижные, но и постоянно меняющие своё положения в пространстве препятствия. В этом случае применяют различные способы решения задачи: алгоритм обхода препятствий, методы поиска пути по графу и интеллектуальные алгоритмы. Адаптивные алгоритмы управления мобильными роботами позволяют существенно повысить независимость принятия решений и автономность при выполнении различных логических задач, спасательных и транспортных операций. Наиболее перспективными в этом направлении являются алгоритмы на базе нейронных сетей. На данный момент нейронные сети – это высокоэффективный инструмент, используемый во многих сферах человеческой жизни – от экономики до робототехники. Причиной такой популярности является способность нейронных сетей к самообучению. Именно это качество планируется использовать при создании мобильного робота, способного ориентироваться в пространстве и планировать движение.

Для представления окружающего пространства в ряде случаев целесообразно использовать нейронные карты. При особых манипуляциях можно получить такую нейронную карту, которая сможет служить в качестве навигационной информации и инструмента для расчета траектории движения в заданном пространстве. Конструктор пути и нейронная карта являются основными составляющими системы планирования пути. Считается, что нейронная сеть преимущественно создается на базе Хопфилда. Дело в том, что данная система, при подаче определенных данных может самостоятельно сформировать нейронную карту. Также этот метод уникален тем, что он обладает высокой производительностью и универсальностью в использовании.

В рамках выпускной квалификационной работы планируется создания мобильного робота с колёсным приводом, предназначенного для выполнения транспортных операций с минимальными временем и энергетическими затратами.

---

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Лисицкий С.А.<sup>a</sup>

## **Проблемы управления бионическими конечностями**

При разработке бионических протезов конечностей одной из сложных задач является создание связи между человеком и управляемой им конечностью.

Новая технология позволяет головному мозгу произвольно управлять мышцами конечностей, минуя спинной мозг. Потенциально она позволит вновь вернуть подвижность парализованным пациентам.

Нейрофизиологи из школы медицины Северо-Западного университета построили систему, которая позволила обезьянам довольно точно действовать парализованной рукой (временный паралич достигался инъекцией препарата, блокирующего прохождение нервных сигналов).

Для начала учёные внедрили в мозг животных крошечные многоэлектродные имплантаты, фиксирующие деятельность около 100 нейронов. Подопытным приматам задали задание – подбирать мячик на конце изогнутой трубки и снова бросать его точно в отверстие.

Во время этих тестов компьютер записывал сигналы, которые мозг посылал в руку. Далее исследователи разработали алгоритм дешифровки, позволяющий по активности всего сотни ключевых нейронов восстанавливать команды, выдаваемые мышцам.

Далее при помощи местной анестезии учёные прервали связь мозга с рукой у подопытных обезьян. К руке экспериментаторы подключили нейропротез. Тот посылал в мышцы слабые электрические импульсы в соответствии с командами компьютера, который, в свою очередь, расшифровывал двигательные сигналы мозга и формировал правильные послания всего за 40 мс.

Хотя с таким обходным путём управления точность движений обезьян снизилась, они быстро научились выполнять то же задание с мячиком. Авторы работы говорят, что ситуация напоминает момент, когда вы берёте в руки новую компьютерную мышь или новую теннисную ракетку – сначала движения кажутся непривычными, но вскоре мозг приспосабливается к новой обстановке, учится, как правильно действовать новым предметом.

---

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

**Направление II: Современные технологии проектирования машин.  
Моделирование технических систем**



Шелофаст В.В., Стайнова Е.Г., Прокопов В.С.<sup>а</sup>

## Комплексный САЕ-анализ – необходимое условие создания совершенных образцов современной техники

Использование компьютерного моделирования и последующего инженерного анализа позволяет получать конструктивные решения, соответствующие лучшим мировым аналогам.

Главным в реализации процессов моделирования и последующего инженерного анализа является наличие необходимых компьютерных программ, простых в эксплуатации, надежных и недорогих по цене. Поскольку в России заявлено о программе импортозамещения, то это в полной мере относится к IT-технологиям. Импортозамещение подразумевает предпочтительное использование отечественных программных продуктов по отношению к зарубежным. Из отечественных программных продуктов наиболее адаптированным к рынку инженерного анализа, по мнению авторов доклада, являются программные продукты компании НТЦ «АПМ».

Предложенное компанией программное обеспечение можно считать комплексным. Под комплексностью понимается возможность выполнения инженерного анализа объектов различной физической природы. Продукты компании способны смоделировать и рассчитать твердые деформированные тела и сборки, объекты под тепловым воздействием и функционирующие в условиях тепловых излучений, процессы, описывающие течение жидкости и газа, электростатические и электромагнитные поля, а также высокочастотные и низкочастотные волны. С использованием ПО компании можно также выполнять инженерный расчет электрических и электронных схем произвольной топологии, и в перспективе анализ при проектировании систем автоматического управления объектами механики, пневмогидродинамики, электроники и комбинированных систем. Наши разработки созданы на базе последних достижений в области численных методов прикладной математики, прикладной физики, современных методов программирования, инженерных и технологических решений.

При создании продуктов компания НТЦ «АПМ» внимательно отслеживает тенденции мировых производителей подобных решений. В последнее время в линейке наших продуктов появились инструменты для инженерного анализа композиционных материалов, для моделирования конструкций за пределом прочности, для моделирования процессов трещиностойкости и многих других. В содержательной части будет представлен полный список проблем доступных для решения, сравнительный количественный и качественный анализ по отношению к мировым производителям аналогичных решений, проблемы верификации и валидации.

Особенно следует отметить инструменты топологической оптимизации, разработанные компанией. Это новое направление в технологии проектирования, реализация которого возможна при использовании аддитивных технологий 3D-печати. Топологическая оптимизация позволяет определить геометрию детали из условия равнопрочности при соблюдении ряда других условий, определенных проектировщиком.

Использование аддитивных технологий позволяет определить наилучшее конструктивное исполнение при заданных граничных и начальных условиях. В ближайшем будущем автоматизированный синтез формы и определение размеров несущих систем представляется наиболее передовой и наиболее вероятной технологией проектирования. Наши программные продукты, несомненно, приближают это будущее.

Созданный нашими разработчиками комплекс программных продуктов эффективно используется для практических расчетов при выполнении заказных расчетных работ. Это способствует эффективному тестированию программного обеспечения на промышленных примерах, ряд из которых будет продемонстрирован.

<sup>а</sup> ООО Научно-технический центр «АПМ»

Крюков В.А.<sup>a</sup>

## Разработка и тестирование имитационной модели червячной передачи

Одним из наиболее важных этапов при исследовании динамики машин является обоснование расчетной схемы и составление на основе этой схемы математической модели. Математические модели передаточных механизмов можно разделить на две большие группы: линейные и нелинейные. И хотя линейных систем в технике реально не существует, для исследования зубчатых механизмов обычно используются линейные модели, описывающие динамику системы с достаточной точностью. Однако существует группа передач, в которых силы трения, описываемые существенно нелинейными зависимостями, соизмеримы с движущими силами. К таким передачам относятся червячные передачи, широко используемые в технике. Наличие больших сил трения может привести к появлению ряда явлений принципиально невозможных в линейных системах, поэтому требуется особый подход к составлению и исследованию математических моделей.

В известных работах, как правило, учитывается только одна нелинейность червячной передачи, связанная с изменением направления внутренних сил при изменении режима движения и направления вращения. При исследовании установившегося режима движения такой подход оправдан, но при исследовании переходных режимов движения он может привести к большим ошибкам. Известно также аналитическое решение, учитывающее существенно нелинейную зависимость коэффициента трения в передаче от скорости относительного скольжения. Однако вид представленных решений, полученных отдельно для каждого режима движения, затрудняет разработку на их основе имитационной модели передачи.

В работе описана универсальная математическая модель червячной пары, учитывающая как изменение направления внутренних сил при изменении режима движения и направления вращения, так и зависимость коэффициента трения в паре от скорости скольжения, справедливой для любого режима движения. Эта модель представлена в виде кинематической и силовой передаточных функций. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения была представлена на основе аппроксимации известных экспериментальных данных.

На основе этой модели и стандартного блока Simulink Embedded Matlab Function был создан собственный элемент, дополняющий пакет SimDriveline, входящий в Simulink. Разработка такого блока позволит в дальнейшем включать его в общую математическую модель машины, отражающую динамические процессы с любой степенью детализации, и разрабатывать на её основе имитационные модели машины.

Созданный блок был протестирован в статическом режиме, а затем на его основе и с использованием стандартных элементов Simulink была составлена имитационная модель простейшей двухмассной системы, включающей в свой состав червячную передачу. Сравнение результатов моделирования с результатами известного аналитического решения подтвердило адекватность предлагаемой имитационной модели. Расхождение результатов не превышает (2-3) %.

Бородина М.Б.<sup>b</sup>

## Проектирование гидромеханических муфт с дифференциальным передаточным механизмом

Сложность проектирования упругой муфты для защиты приводов высокодинамичных машин состоит в том, что упругая муфта может эффективно работать только в ограниченном диапазоне частот, так как при выходе из этого диапазона создаётся опасность резонансного режима. Так как во многих тяжелонагруженных машинах металлургической и горной промышленности частота воздействия динамических нагрузок на привод со стороны

<sup>a</sup> Тульский государственный университет

<sup>a</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

технологической машины зависит от многих заранее не известных факторов и может изменяться в широком диапазоне, то жёсткость упругой муфты должна изменяться в идеале таким образом, чтобы не только исключить резонансный режим работы, но и обеспечить минимальную амплитуду динамических нагрузок на привод.

Возможностью управления коэффициентом жёсткости обладают гидромеханические муфты с дифференциальным передаточным механизмом (патенты РФ на изобретения № 2310778, №2607493 и пр.), в которых передача момента от ведущего вала привода на ведомый вал технологической машины осуществляется через передаточный механизм, вторая степень свободы которого связана с гидросистемой муфты. Рабочие параметры элементов гидросистемы (начальное давление в гидроаккумуляторе, расход жидкости) можно регулировать встроенной системой управления, изменяя, таким образом, жёсткость муфты. Это позволит адаптировать работу муфты к изменяющемуся режиму работы технологической машины, минимизируя амплитуду динамических нагрузок на привод.

Проектирование такого вида муфт сводится к проектированию трёх частей муфты (механической, гидравлической и системы управления) и взаимосвязей между ними.

Элементы механической части муфты проектируются и рассчитываются по стандартным методикам с учётом максимального момента, передаваемого муфтой. Состояние второй степени свободы передаточного механизма определяется режимом работы управляемой гидросистемы муфты.

Расчёт и проектирование элементов гидросистемы выполняется с учётом максимального и номинального давления в гидросистеме и расхода жидкости. Исследования муфты показали, что расход жидкости в гидросистеме и начальное давление в газовой камере гидроаккумулятора, выполняющего роль упругого элемента гидросистемы, непосредственно влияют на жёсткость муфты.

Система управления может быть выполнена на электромеханической базе и осуществляет управление параметрами элементов гидросистемы муфты на основании экспертных оценок данных, полученных от датчиков момента на ведущем и ведомом валах, датчиков давления в напорной магистрали гидросистемы и в газовой полости гидроаккумулятора.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований динамики работы муфты были построены зависимости амплитудного значения динамического момента от параметров гидросистемы при определённой частоте вынуждающих воздействий со стороны технологической машины. Используя эти зависимости, система управления может адаптировать параметры гидросистемы муфты в процессе работы привода таким образом, чтобы амплитуда динамических нагрузок на электродвигатель была минимальна.

Такое решение позволит управлять динамикой работы привода машины в целом и эффективно защищать привод от динамических нагрузок высокой интенсивности.

**Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В.<sup>a</sup>**

## **Инженерный анализ и новые технологии в методе конечных элементов**

Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из ведущих инструментов исследования сложных систем, физические процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

Триангуляция расчетной области поля приводит к появлению шаблонов разнообразной формы, среди которых в зонах развитой геометрии появляются тупоугольные фрагменты или их объемные аналоги в случае 3D-измерения. В аппарате МКЭ имеются элементы высокого порядка аппроксимации, но, как правило, в программных продуктах реализованы вычислительные алгоритмы для симплекс-элементов. Тупоугольные линейные фрагменты обуславливают неконтролируемую погрешность, что в итоге снижает достоверность результатов инженерного анализа.

<sup>a</sup> Вологодский государственный университет

В работе найдено решение для континуального множества элементарных матриц жесткости (МЖ) линейного конечного элемента (КЭ). Континуальная модель КЭ содержит в своем составе, как классическое решение, так и ряд универсальных. Доказательство континуальности опирается на факт непрерывной зависимости элементов МЖ от координат точки  $N(x, y) \in KЭ$ . С другой стороны, все точки  $N(x, y)$  образуют множество, мощность которого определяется как континуум. При этом, поскольку в качестве точки  $N(x, y)$ , относительно которой формируются балансные уравнения, может служить любая, кроме узловых, то и число МЖ также образует множество мощностью континуум.

Установлено, что классическое решение для МЖ совпадает с континуальной формой при условии определения её относительно центра описанной окружности. Поскольку точка центра описанной окружности для тупоугольного КЭ лежит за контуром шаблона, то классическая МЖ в этом случае не существует, как не имеющая физического смысла, хотя формально может быть вычислена классическими технологиями. Это является одной из двух причин, указывающих на невозможность использования таких фрагментов в классической интерпретации МКЭ.

Основное отличие полученных соотношений заключается в возможности снять ограничения на форму КЭ благодаря соответствующему выбору элементарной матрицы жесткости и базисной функции. При использовании универсальных решений обусловленность конечно-элементарной системы уравнений улучшается, что повышает в итоге достоверность проводимых расчетов при заданной методологической погрешности.

Рекомендации использования тупоугольных фрагментов в МКЭ формулируются следующим образом:

- для тупоугольных КЭ базисная функция должна быть выбрана в локальной системе координат, связанной с самой длинной из сторон КЭ;
- в качестве точки  $N(x, y)$ , относительно которой рекомендуется вычислять МЖ, следует выбрать либо центр тяжести, либо центр вписанной в КЭ окружности, которые всегда лежат внутри контура КЭ при любой его форме;
- градиенты следует вычислять из указанной базисной функции.

Методологическая погрешность решения, при выполнении указанных замечаний, всегда будет сохраняться на уровне  $O(h^2)$ . Распространение концепции континуальной МЖ к трехмерным полям для КЭ типа тетраэдр предполагается. Предложенная технология рассматривается в качестве пилотной и должна быть апробирована на примерах.

Прейс В.В.<sup>а</sup>

## Математическая модель фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающимися воронками

В статье рассмотрен новый подход к построению корректной математической модели фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающимися воронками для захвата равноразмерных осесимметричных предметов обработки формы тел вращения.

Недостатком математических функций, предложенных ранее для описания вероятностей, входящих в математические модели фактической производительности бункерных загрузочных устройств, является тот факт, что в зависимости от значений аргументов они могут иметь произвольные значения, в том числе больше единицы или меньше нуля, что противоречит физическому смыслу вероятности. Все это обусловило значительные расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства в определенных областях существования физико-технических параметров, характеризующих загружаемые предметы обработки, вращающиеся воронки и бункерного загрузочного устройства в целом.

<sup>а</sup> Тульский государственный университет

Для описания вероятностей предложены новые математические зависимости на основе показательной функции и функции Гомперца. Использование указанных функций позволило получить более корректную и адекватную математическую модель фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающимися воронками, применяемого в технологических роторных машинах.

Предложенная математическая модель фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающимися воронками реализована в программной среде *MathCad15*.

В качестве примера представлены результаты компьютерного моделирования фактической производительности однопозиционного роторного бункерного загрузочного устройства в зависимости от частоты вращения воронки и динамического параметра для равноразмерного предмета обработки типа стакана.

Было выявлено, что существенное влияние на максимальное значение фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства оказывает отношение габаритных размеров и коэффициент трения скольжения предметов обработки. Так, увеличение коэффициента трения предметов обработки с 0,15 до 0,45 приводит к снижению максимального значения фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства от 25 до 50 % в зависимости от отношения габаритных размеров загружаемых предметов обработки.

Сопоставление результатов моделирования производительности с имеющимися экспериментальными данными показало, что предложенная математическая модель фактической производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающейся воронкой обладает большей адекватностью и корректностью по сравнению с ранее предложенными моделями.

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать на стадии проектирования фактическую производительность роторного бункерного загрузочного устройства.

Коробко А.В., Калашникова Н.Г.<sup>а</sup>

## Геометрическое моделирование формой в задачах технической теории пластинок

В технической теории пластинок известен класс задач, описываемый дифференциальными уравнениями эллиптического типа четвертого порядка (поперечный изгиб, свободные колебания). Этому классу задач соответствуют интегральные физические характеристики (ИФХ): максимальный прогиб  $w_0$ , основная частота колебаний  $\omega$  пластинок. Эти физические характеристики зависят от геометрических размеров, физических свойств материала и граничных условий. Если сопоставлять равновеликие пластинки разной формы, выполненные из одного и того же материала и работающие при одинаковых граничных условиях, то как показано в монографии [1], искомые ИФХ будут зависеть только от формы пластинок – от интегральной геометрической характеристики формы (коэффициента формы  $K_f$ ), которая представляется контурным интегралом  $K_{fa} = \oint ds/h$ , где используемые обозначения указаны на рисунке 1.

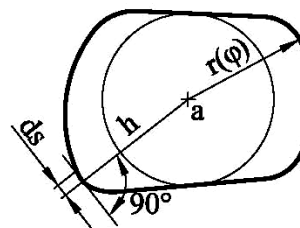


Рисунок 1

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева



Проведенные в [1] исследования показали, что ИФХ функционально связаны с коэффициентом формы. Поэтому основные свойства и закономерности изменения ИФХ для определенного (заданного) множества форм пластинок можно изучать по поведению  $K_f$  при геометрическом моделировании формы пластинок. Графики изменения коэффициента формы и ИФХ во многих случаях подобны и значения ИФХ можно получить по соответствующим графикам изменения  $K_f$ , используя прием линейного масштабирования.

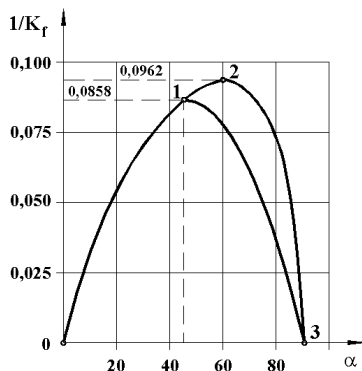


Рисунок 2

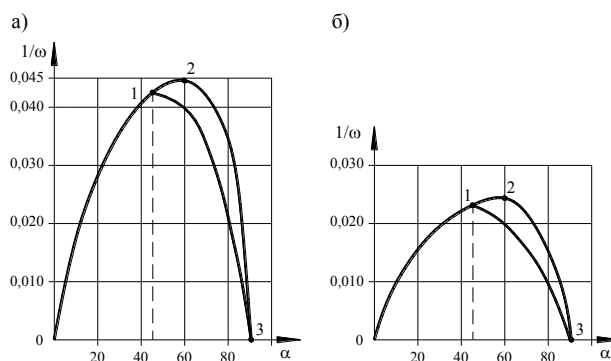


Рисунок 3

На рисунке 2 представлен график  $1/K_f - \alpha$  ( $\alpha$  – от угла при основании равнобедренного треугольника), а на рисунке 3 – график  $1/\omega - \alpha$  для жестко защемленных и шарнирно опертых пластинок. Из этих графиков видно, что для нахождения основной частоты колебаний можно использовать прием масштабирования. Аналогичный прием можно эффективно использовать и для других форм пластинок.

Литература

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 302 с.

Тюрин В.О.<sup>а</sup>

## Динамика роторов с лепестковыми газодинамическими подшипниками

Работа машин с быстровращающимися роторами сопровождается вибрацией, повышение которой может привести к поломке валов, опор, агрегатов двигателя и всей машины. Понижение вибрационного состояния двигателя основано на введении в устройство опор скольжения, обладающих высокими демпфирующими свойствами. Перспективными в данном классе являются лепестковые газодинамические подшипники. Особенностью лепестковых подшипников является способность к изменению профиля рабочего зазора в соответствии с режимом работы. Податливость и малая масса лепестков позволяют им легко отслеживать колебания ротора, вызываемые дисбалансом или внешними возмущениями, и надежно работать в условиях тепловых деформаций корпусов, при попадании в рабочие зазоры грязи, при малых толщинах смазочного слоя и малых расходах смазки. Лепестковые подшипники нашли широкое применение в качестве опор высокоскоростных роторов в транспортном и энергетическом машиностроении благодаря своей способности эффективно рассеивать энергию колебаний. Известные на данный момент конструкции являются уникальными и требуют в каждом конкретном случае создания математической модели расчета динамических характеристик.

Динамический анализ роторных систем включает в себя целый комплекс расчетов, при проведении которых можно выделить два направления: 1) рассматривается динамика ротора как твердого тела с упругими и инерционными свойствами, при этом действия опор заменяются

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева



линеаризованными силами; 2) акцент делается на нелинейных свойствах несущего смазочного слоя с использованием простых схем ротора. В общем случае выделяют: модальный, гармонический, статический и переходный анализы. Модальный анализ включает в себя различные виды расчетов, связанные с определением собственных частот вращения, отклик ротора на различные виды воздействий, прогиб и закручивание валов, вопросы устойчивости движения, расчет кривых подвижного равновесия, матриц коэффициентов жесткости и демпфирования, построение диаграмм Кэмпбелла. Отдельный комплекс задач связан с расчетом напряженно-деформированного состояния элементов ротора. Гармонический анализ роторных систем связан с определением перемещений при разных частотах вращения и возбуждающих силах.

Основными задачами динамики ротора, опирающегося на подшипники скольжения, являются определение траекторий движения ротора и анализ его устойчивости. Анализ возможных траекторий движений ротора позволяет оценить выбранные на этапе проектирования геометрические и рабочие параметры роторной системы и всей турбомашины, а также принять адекватное решение об их изменении в случае необходимости. Это способствует выбору правильного подхода при проектировании роторной системы с точки зрения удовлетворения эксплуатационным и технологическим требованиям, а также обеспечения устойчивой работы роторно-опорного узла на рабочих частотах и при переходных процессах. Анализ устойчивости движения ротора требует решения характеристических уравнений движения, которые исследуются на основе теории Ляпунова. Такой подход приводит к решению характеристических уравнений возмущенного движения с применением критериев Рауса–Гурвица, Найквиста, Михайлова и др.

Расчет динамических характеристик лепестковых газодинамических подшипников основывается на определении полей давления в смазочном слое, которые основываются на базовых уравнениях гидродинамической теории смазки: уравнения Рейнольдса и баланса энергий, а также соотношения для расчета гидродинамических и теплофизических параметров среды, которые замыкают систему дифференциальных уравнений. Наибольшие сложности связаны с решением обобщенного уравнения Рейнольдса, в основу которого положены два фундаментальных уравнения гидромеханики, отражающие законы сохранения импульса и массы: уравнения Навье-Стокса и неразрывности.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

**Чернышев В.И., Фоминова О.В.<sup>а</sup>**

## **Разработка и верификация гироскопической модели роторной системы**

Повышение производительности машин, сопровождаемое увеличением скоростей вращения и передаваемых нагрузок при одновременном снижении габаритов и массы изделий, обуславливает необходимость разработки адекватных математических моделей и соответствующего программного обеспечения для решения задач динамики, управления и обеспечения вибрационной безопасности. Применительно к роторным системам данные модели должны отображать взаимосвязанные колебания системы «привод-ротор-опоры-корпус» и учитывать специфические гироскопические эффекты, которые проявляются при быстром вращении ротора.

Расчетная схема роторной системы предусматривает три системы координат: инерциальную (неподвижную) и две неинерциальные (подвижные). Оси первой неинерциальной системы координат жестко связаны с корпусом и соответственно с закрепленным на нем приводом, а оси второй – жестко связаны с ротором. Причем эти системы имеют общее начало,

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

совмещенное с муфтой привода. Принято, что ротор шарнирно соединен с муфтой и опирается на упругодемпфирующие опоры.

Для описания пространственного движения ротора используются кинематические и динамические уравнения Эйлера. При формировании и преобразовании моментов от упругих, диссипативных и инерционных сил использовались матрицы поворота, которые позволяют получать векторные компоненты в принятых системах координат.

Отмечается, что на показатели вибрационной безопасности роторных систем существенное влияние оказывает проникающая вибрация, распространяющаяся по цепочке «привод-корпус-ротор». Это связано с тем, что среднеквадратические значения данной вибрации на представительных временных интервалах, как правило, соизмеримы с величиной зазора в подшипниковых узлах жидкостного трения. Кроме того, наблюдаемые гироскопические эффекты обусловлены необычной реакцией ротора на «длительное» воздействие, когда сила стремится повернуть ротор относительно одной оси, а он поворачивается вокруг другой перпендикулярной ей оси, совершая прецессионное движение. При этом прецессионное движение будет происходить в течение всего времени действия внешней силы, а прекращается с прекращением её действия, что определяет свойство безынерционности. Под действием ударного воздействия ось ротора практически не изменяет первоначального направления, а лишь совершает быстрые колебания с небольшой амплитудой, то есть нутационные движения.

Данные признаки положены в основу верификации разработанной гироскопической модели роторной системы – использованы результаты моделирования и лабораторных экспериментов.

**Сытин А.В., Кузавка А.В.<sup>a</sup>**

## **Лепестковые газодинамические подшипники с пьезоэлементами**

Возможность использовать пьезоэлементы в качестве устройств регистрации механического воздействия, обусловленная явлением прямого пьезоэффекта, а также в качестве актуаторов под действием подаваемого напряжения на основании явления обратного пьезоэффекта, ведет к лавинообразному внедрению данных элементов в различных областях науки и техники. Интегрирование информационных технологий в машиностроение привело к появлению новой области исследования – мехатронные подшипники с активным управлением, которые позволяют регистрировать состояние наиболее важных элементов машины и значения широкого спектра рабочих параметров, а также влиять на работу роторно-опорного узла.

Применение пьезоактуаторов в подшипниках скольжения осуществляется следующим образом:

- корректировка геометрии зазора между ротором и опорной поверхностью, состоящей из жестких подвижных сегментов или комплекта упругих элементов, за счет расположения в местах крепления пакетных пьезоактуаторов, а также за счет применения биморфных пьезопластин в конструкциях лепестковых газодинамических подшипников (ЛГДП);

- оперирование системой подачи смазочного материала, включение и выключение, а также изменения напорных характеристик осуществляется, как правило, регуляторами, дросселями и подобными устройствами на основе пьезоприводов;

- использование магнитоэологических и ферромагнитных жидкостей в совокупности с системой электромагнитного подвеса;

- комбинация вышеуказанных методов в различных конструкциях опор.

Особый интерес представляет интеграция пьезоактуатора как исполнительного механизма в роторно-опорный узел в местах крепления упругих элементов в ЛГДП, а также между ними для создания дополнительной жесткости, а также расширения кинематических и мощностных границ применения данных опор. Целью такой синергетики является наблюдение за положением

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

ротора в процессе работы машины и регулирование его поведения при высоких скоростях. Применение пьезоэлементов в подшипниках скольжения расширяет границы их применения, нивелируя недостатки, повышая ресурс и надежность всей системы.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Сливинский Е.В., Радин С.Ю., Гридчина И.Н.<sup>а</sup>

## Исследование пространственных колебаний двухзвенного автопоезда

Для аналитического исследования колебаний и силового нагружения конструктивных элементов автотракторного самосвального прицепа 2ПТС-4-793А разработана расчётная схема автотракторного поезда, эквивалентная натурному автопоезду, состоящему из автомобиля тягача ГАЗ-53А и прицепа 2ПТС-4-793А. Анализ модели показывает, что по геометрическим размерам ее связей и элементов можно определить абсолютные перемещения центров тяжести рассматриваемых масс, необходимые для составления уравнений кинетической и потенциальной энергий системы. Из представленной динамической модели и систем дифференциальных уравнений видно, что рассматриваемая система с пятью степенями свободы может совершать пять независимых гармонических колебаний, каждому из которых соответствует определенное значение собственной частоты. Известно, что максимумы амплитудно-частотных характеристик находятся вблизи собственных частот [1-4], поэтому наличие спектра собственных частот дает возможность предсказать места максимумов значений амплитуд, и, наоборот, по максимумам можно определить собственные частоты системы. В реальных условиях при колебаниях автопоезда в такой системе практически содержится столько частот, сколько максимумов значений обобщённых координат проявляется во всех их диапазонах.

Зная геометрические и жесткостные параметры модели и задаваясь частотой вынужденных колебаний системы в пределах от 0 до 50 рад/с, а также амплитудами кинематических координат [2-4], на ЭВМ с использованием программного комплекса Maple 9.5 вычислены значения динамических составляющих усилий и моментов, действующих на приведенные массы модели.

Полученные амплитудно-частотные графики на разработанной физической и математической моделях автопоезда показали, что наиболее существенные составляющие динамических нагрузок возникают преимущественно при подёргивании и вилянии прицепа. Такие нагрузки расшатывают крепления, смонтированные на раме и подкатной тележке, конструктивных элементов и узлов, и выводят из строя несущие конструкции, форсируют износ сопряжённых деталей сцепного устройства и в целом ухудшают показатель устойчивости движения прицепа.

Анализ полученных результатов аналитического исследования показывает, что установка предложенного технического решения, выполненного по патенту RU2338658 на автотракторные самосвальные прицепы семейства 2ПТС-4, позволяет отметить положительную тенденцию в части улучшения устойчивости движения прицепа в целом, что позволит в итоге добиться показателей, предусмотренных ГОСТ 2349-54 и ГОСТ 13377-67, используемых в данной области техники.

### Литература

1. Глуценко А.Д., Сливинский Е.В. Динамика и прочность транспортной системы для перевозки легковесных грузов. Ташкент: Фан, 1988. 116 с.
2. Закин Я.Х. Прикладная теория движения автопоезда. М.: Транспорт, 1987. С. 286.
3. Сливинский Е.В. Исследование колебаний и силового нагружения тракторного самосвального прицепа 2ПТС-4-793А. Автореф. дис. канд. техн. наук. Алма-Ата: СХИ, 1977. 165 с.
4. Глуценко А.Д., Гроховский Ю.В., Сливинский Е.В. Исследование колебаний и силового нагружения тракторного самосвального прицепа 2ПТС-4-793А//Тракторы и сельхозмашины, 1980. № 4. С. 8-11.

<sup>а</sup> Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина

Прокопов Е.Е.<sup>a</sup>

### **Динамика систем виброзащиты с нелинейной характеристикой восстанавливающих сил**

На динамические свойства любой виброзащитной системы существенное влияние оказывают процесс демпфирования.

При «пассивном» варианте исполнения упругодемпфирующих звеньев систем виброзащиты улучшение их антирезонансных и противоударных свойств достигается при использовании управляемых демпферов и упругих звеньев с переключаемой (управляемой) жесткостью. Процесс управления в системах виброзащиты осуществляется за счет определенного изменения диссипативной или восстанавливающей силы. При этом алгоритм управления, который переводит диссипативную или восстанавливающую силу в разряд компенсационного воздействия, базируется на информации о компонентах состояния системы в амплитудно-фазовой области.

Включаемые в состав систем виброзащиты устройства должны адекватно реагировать на внешние воздействия и поддерживать оптимальный в соответствии с принятым критерием качества виброзащиты процесс формирования компенсационного воздействия. Это полностью относится к таким необходимым устройствам виброзащитной техники, как упругие звенья.

Использование переключателей жесткости упругих звеньев позволяет виброзащитной системе формировать восстанавливающие силы по принципу активного воздействия и осуществить «перевод» соответствующих систем в разряд управляемых. При этом предельные варианты виброзащиты достигаются только при оптимальных параметрах прерывистой восстанавливающей силы, «имитирующей» компенсационное воздействие по типу активных систем.

Отсутствие всесторонних данных об антирезонансных и противоударных свойствах систем виброзащиты с нелинейными характеристиками восстанавливающих сил предопределяет значимость выбранного направления исследования. Основные расчетные зависимости для анализа динамических свойств подобных систем получены методом гармонического баланса.

Смещение резонансных пиков в область более низких частот повышает эффективность виброзащиты – коэффициент динамичности становится меньше единицы при  $\eta > 1$  (в отличие от  $\eta > 1.41$  при постоянной жесткости и демпфировании).

Следует отметить, что с увеличением соотношения жесткостей значения коэффициентов динамичности в зарезонансной области частот практически не изменяется. В связи с этим можно говорить об оптимальной последовательности переключений жесткости, при которой передача динамических нагрузок через упругий элемент исключается.

Сдвиг фазы  $\omega t_1$  характеризует реакцию виброзащитной системы на расстройку частот и определяет моменты времени переключения с меньшей на большую жесткость. Продолжительность самих интервалов переключений, как это следует из соотношения, не зависит ни от собственной частоты системы, ни от величины соотношения жесткостей.

Практическое использование амортизаторов с элементами управления упругих звеньев позволяет избежать резонансных явлений и значительно улучшить условия труда операторов мобильных машин.

Канатников Н.В., Анисимов Р.В.<sup>b</sup>

### **Комплексная модель процесса обработки колес с внутренними незвольвентными зубьями**

Изучению тепловых явлений при резании в технологической науке традиционно посвящалось отдельное направление исследований, получившее благодаря работам

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

А.Н. Резникова название «Теплофизика резания». Эта отрасль успешно развивается применительно к процессам обработки лезвийным инструментом. Однако темпы внедрения методов и рекомендаций теплофизики процессов механической обработки в инженерную практику не удовлетворяют задачам повышения эффективности технологических процессов. Одной из причин этого является то, что исследования направлены на изучение наиболее распространенных и хорошо изученных процессов – точения, фрезерования и др. Однако в конструкциях современных машин и механизмов широко применяются детали, рабочие поверхности которых требуют более сложной механической обработки, в частности, зубчатые колеса с внутренними периодическими неэвольвентными профилями. Такими деталями комплектуются различного рода моментопередающие механизмы и соединения (эксцентриково - циклоидальные передачи, планетарные механизмы, шестеренчатые насосы, храповые механизмы, шлицевые соединения (прямоугольные, треугольные, РК- и К-профиля и др.). Такие механизмы и машины используются в строительных и горных машинах, сельскохозяйственной технике, авиапромышленности, подъемно-транспортном оборудовании, железнодорожном транспорте и других отраслях.

Авторами предложена новая модель процесса обработки колес с внутренними неэвольвентными зубьями. Суть модели заключается в последовательном использовании определенных методов анализа технологических процессов. На первом этапе моделирования использован аналитический метод пространственного отображения схемы резания А.С. Тарапанова, Г.А. Харламова. Используя данный подход, рассчитываются геометрические параметры стружки на исследуемом резе, а также кинематическое изменение переднего и заднего углов резания. Далее строятся трехмерные модели детали и заготовки, а затем выполняется численное моделирование процесса резания с учетом рассчитанных данных. Анализ результатов моделирования позволяет получить зависимости влияния конструкторско-технологических параметров системы на тепловые явления сопровождающие процесс резания. Таким образом, модель основана на синтезе методов аналитического и численного моделирования и реализует новый, перспективный подход гибридного моделирования.

Предложенная авторами модель процесса обработки колес с внутренними неэвольвентными зубьями позволяет прогнозировать точность и качество изделий с учетом температурных явлений в зоне обработки. Ещё одним преимуществом предлагаемой модели является визуализация процесса обработки в целях изучения особенностей конструкции режущей части инструмента, процесса съема стружки и генерируемой поверхности детали.

*Коллектив авторов выражает благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (РФФИ) за оказанную финансовую поддержку при выполнении гранта № 16-38-00420-мол\_а.*

Корнеев А.Ю.<sup>а</sup>, Ли Шенбо<sup>б</sup>

## Получение аналитической зависимости энтальпии смазочного материала в рабочем зазоре конического подшипника жидкостного трения

Одной из главных задач практически любого научного исследования в области подшипников жидкостного трения является создание программного обеспечения, позволяющего с заданной точностью производить моделирование (расчет) той или иной гидродинамической системы. Решая данную задачу с учетом переменных теплофизических свойств смазочного материала, необходимо в математическую модель вписать зависимости плотности, вязкости, теплоемкости и энтальпии от температуры, но напрямую сделать это невозможно, т.к. в справочной литературе они представлены в табличном виде, поэтому появляется необходимость их аналитической записи. Для этого необходимо провести аппроксимацию рассматриваемых теплофизических свойств смазочного материала. Существует довольно много программ для аппроксимации, в том числе такие как MathCAD и MatLab. Однако для получения требуемого

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>б</sup> Сямьинский технологический университет (Китайская народная республика)



результата – аналитических зависимостей – при помощи данных программ необходимо: 1) иметь навык работы с ними, и 2) написание алгоритма аппроксимации, что занимает определенное время.

В программе TableCurve, в отличие от MathCAD и MatLab, для решения задачи аппроксимации достаточно ввести известные данные и выбрать из предложенного списка функций наиболее подходящую по форме записи и по статистическим критериям, предлагаемым программой. В основе работы TableCurve заложен метод наименьших квадратов для нелинейной и линейной регрессии с одной независимой переменной. Все это значительно сокращает время, затрачиваемое на получение конечного результата, и расширяет возможности поиска приемлемого решения для каждой задачи. Именно поэтому для получения аналитических зависимостей в данной работе использовалось программное обеспечение TableCurve.

Целью данной работы является нахождение на основании экспериментальных данных, приведенных в таблицах [1,2], аналитических зависимостей плотности, вязкости, удельной теплоемкости и энтальпии в зависимости от температуры различных смазочных материалов. Выбор лишь одного независимого параметра (температуры), а не двух (температуры и давления) в случае с маслами, обусловлен тем, что теплофизические свойства масел практически не зависят от изменения давления.

Аппроксимация теплофизических свойств смазочных материалов с помощью программы TableCurve позволяет получить кривые, являющиеся функциями теплофизических свойств этих материалов, которые могут быть записаны в виде аналитических зависимостей. Для воды, водорода и фреонов нахождение табличных данных по всем интересующим теплофизическим свойствам не представляет проблемы, для масел же довольно проблематично найти зависимость энтальпии от температуры. Решить данную проблему можно, если воспользоваться следующим алгоритмом для нахождения аналитической зависимости энтальпии от температуры:

1) определить температуру застывания масла, например  $-15^{\circ}\text{C}$  (ТП-22);  $-10^{\circ}\text{C}$  (ТП-30) [1];

2) принять энтальпию при данной температуре, равную нулю:  $i(T_0) = 0$  Дж/кг;

3) рассчитать энтальпию масел по формуле:  $i(T) = i(T_0) + \int_{T_0}^T C_p(T) dT$ , учитывая, что

$i(T_0) = 0$  и зная  $C_p(T)$ , получаем следующее уравнение:  $i(T) = C_p(T)(T - T_0)$ ;

4) полученные значения аппроксимируем с помощью программы TableCurve.

Предложенный алгоритм универсален и может быть применен к любому смазочному материалу. Используя полученные аналитические зависимости теплофизических свойств смазочных материалов в математической модели расчета опор скольжения, с учетом уравнений Рейнольдса, баланса энергий и дополнительных соотношений, замыкающих систему, можно определить функцию поля давлений и, как следствие, рассчитать несущую способность, являющуюся одной из важнейших характеристик подшипника.

*Тезисы докладов подготовлены в рамках поддержки Государственного фонда естественных наук Китая (грант № 51405410) и Государственного фонда естественных наук провинции Фуцзянь (КНР) (грант № 2015J01228).*

Литература

1. Максимов В.А., Баткис Г.С. Высокоскоростные опоры скольжения гидродинамического трения. Казань: изд-во «Фэн», 2004. – 406 с.

2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 708 с.

**Мухаметзянова А.Г., Долгова Н.В.<sup>а</sup>**

## **Численное моделирование гидродинамики в статическом смесителе Kenics KM**

Статические смесители винтового типа Kenics KM нашли применение в самых разнообразных отраслях промышленности [1], и для каждого конкретного процесса требуется

<sup>а</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет



подбор оптимальных геометрических параметров смесителя. Особенности конструкции смесителя Kenics KM рассмотрены в статье [2]. В данной работе рассмотрено численное моделирование гидродинамики потока в смесителе Kenics KM с использованием CFD-пакета ANSYS Fluent.

Ранее была создана трехмерная модель расчетной области статического смесителя Kenics KM [2] и конечно-элементная сетка на её основе [3]. Для того, чтобы проверить адекватность модели, необходимо произвести сравнение расчетных данных с экспериментальными. В качестве источника экспериментальных данных для сравнения была выбрана статья [4], где в графическом виде представлены полученные методом физического эксперимента значения составляющей скорости по оси  $z$  в двух сечениях трубы. Геометрические параметры смесителя: диаметр  $D = 0,074$  м, длина смесителя  $L = 0,99$  м, длина одной вставки  $H = 0,113$  м, длины входного и выходного участков трубы  $l_{вх} = 0,205$  м и  $l_{вых} = 0,11$  м, соответственно. В качестве рабочей жидкости была использована вода, температура которой составляла  $20$  °С, плотность  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>.

При проведении расчетов использовалась модель турбулентности  $k$ -epsilon Realizable со стандартной пристеночной функцией. Расчеты проводились при значениях скорости на входе:  $v = 0,067$  м/с,  $v = 0,135$  м/с,  $v = 0,244$  м/с, соответствующих значениям критерия Рейнольдса:  $Re = 5000$ ,  $Re = 10000$ ,  $Re = 18000$ . При этом в первых двух случаях был применен первый порядок дискретизации, а в третьем случае при  $Re = 18000$  в целях достижения более точного решения был выбран второй порядок дискретизации. После задания всех параметров была произведена гибридная инициализация решения и запущен расчет. В случае, когда была задана скорость  $v = 0,067$  м/с при расчете невязки вышли на плато после 530 итераций. При заданной на входе скорости  $v = 0,135$  м/с решение сошлось после 670 итераций, а при  $v = 0,244$  м/с – после 14600 итераций. Сравнительные графики значений осевой составляющей скорости  $v_z$  в сечении  $\frac{1}{2}$  пятого элемента смесителя представлены на рисунке 1, где  $r$  – расстояние от оси смесителя до точки, в которой производились измерения,  $R$  – радиус смесителя.

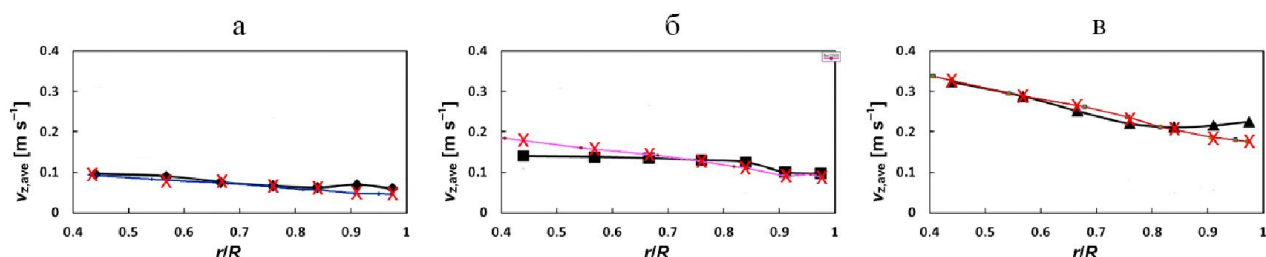


Рисунок 1 – Сравнение значений осевой составляющей скорости  $v_z$ , полученных в результате численного (x) и физического экспериментов:  $Re = 5000$  (а),  $Re = 10000$  (б),  $Re = 18000$  (в)

Сравнение экспериментальных данных с расчетными показало удовлетворительное согласование. Минимальное, максимальное и среднее расхождение составляют соответственно 1,3%, 26,5% и 9,8% при  $Re=5000$ , 0,8% и 19,7%, 7,7% при  $Re=10000$ , 0,7%, 22,4% и 9,2% при  $Re=18000$ , что подтверждает адекватность полученных аналитических результатов и позволяет с уверенностью предсказывать характер турбулентного течения для других аналогичных условий и смесителей аналогичной геометрии.

#### Литература

1. Thakur R.K. Static mixers in the process industries-a review / R.K. Thakur, Ch. Vial, K.D.P. Nigam, E.B. Nauman and G. Djelveh // Trans IchemE. - August 2003. - V. 81. - Part A. - P. 787-826.
2. Мухаметзянова А.Г., Сосков В.Н., Алексеев К.А., Долгова Н.В. Создание трехмерной расчетной области и генерация сетки для CFD-моделирования гидродинамики потока в статических смесителях Kenics KM. Часть 1. Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 4. С. 93-95.
3. Мухаметзянова А.Г., Сосков В.Н., Алексеев К.А., Долгова Н.В. Создание трехмерной расчетной области и генерация сетки для CFD-моделирования гидродинамики потока в статических смесителях Kenics KM. Часть 2. Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 4. С. 101-102.
4. Murasiewicz H. Investigation of turbulent flow field in a Kenics static mixer by Laser Doppler Anemometry / H. Murasiewicz, Z. Jaworski // Chemical Papers. – 2013. – V.67 (9). – P.1188–1200.

Корнаева Е.П., Корнаев А.В.<sup>а</sup>

## Построение приближенных моделей неизотермических течений вязкой жидкости в конфузорных каналах на основе анализа безразмерных критериев подобия

Рассматриваются течения вязких сред в конфузорных каналах переменной геометрии применительно к уплотнительным и опорным элементам роторных машин, которые имеют широкое применение в машиностроительной, металлургической отрасли, а также в авиа- и ракетостроении. Наличие высоких скоростей вращения, внутреннего трения, а зачастую использование криогенных жидкостей обуславливают необходимость учета влияния тепловых эффектов на рабочие характеристики рассматриваемых объектов. Работы, посвященные исследованию характеристик подшипников жидкостного трения и уплотнений в неизотермической постановке, учитывают либо теплообмен за счет теплопроводности, либо конвекцию, считая, что все тепло уносится смазкой, а уравнение энергии осредняется по толщине слоя. В работе будет показано, что такое допущение справедливо в узком диапазоне факторов, например, при небольших скоростях вращения или для маловязких жидкостей.

Уравнение теплового баланса в безразмерных переменных представлено в виде:

$$\begin{aligned} Sh \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \vartheta \hat{V}_1 \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_1} + \psi \frac{\hat{V}_2}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_2} + \eta \hat{V}_3 \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_3} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \left( \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_1^2} + \frac{1}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_1} + \frac{\psi^2}{(\hat{\beta}_1 + \gamma)^2} \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_2^2} + \eta^2 \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_3^2} \right) + \\ + \frac{2Ec}{\text{Re}} \left( \vartheta^2 \left( \frac{\partial \hat{V}_1}{\partial \hat{\beta}_1} \right)^2 + \left( \frac{\psi}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \frac{\partial \hat{V}_2}{\partial \hat{\beta}_2} + \vartheta \frac{\hat{V}_1}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \right)^2 + \eta^2 \left( \frac{\partial \hat{V}_3}{\partial \hat{\beta}_3} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\vartheta \psi}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \frac{\partial \hat{V}_1}{\partial \hat{\beta}_2} + \frac{\partial \hat{V}_2}{\partial \hat{\beta}_1} - \frac{\hat{V}_2}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left( \vartheta \eta \frac{\partial \hat{V}_1}{\partial \hat{\beta}_3} + \frac{\partial \hat{V}_3}{\partial \hat{\beta}_1} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \eta \frac{\partial \hat{V}_2}{\partial \hat{\beta}_3} + \frac{\psi}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \frac{\partial \hat{V}_3}{\partial \hat{\beta}_2} \right)^2 \right). \end{aligned}$$

где  $\vartheta = kh_0\omega/V^*$ ,  $\gamma = r/h_0$ ,  $\eta = h_0/L$  - кинематический и геометрические параметры;

$Sh = h_0/(\tau V^*)$ ,  $\text{Re} = h_0 V^*/\mu$ ,  $\text{Pr} = \mu/(a\rho)$ ,  $Ec = (V^*)^2/(\rho C_p)$  критерии

Струхала, Рейнольдса, Прандтля, Эккерта соответственно.

Как видно из уравнения конвективные и диссипативные слагаемые в самом общем случае незначимы для случая  $Ec \ll \text{Re}$ :  $\text{Re} \leq 10^0$  и  $\text{Pr} \sim 10^2$  или для маловязких жидкостей  $\text{Pr} \sim 10^{-1}$  и значениях  $\text{Re} \leq 10^4$ . Задавая характерные для рассматриваемого объекта значения геометрических, статических, кинематических и термодинамических характеристик, можно приближенно оценить порядки слагаемых в уравнении. В результате чего уравнение можно записать в упрощенном (приближенном) виде. Так, например, для объектов, характеристики которых удовлетворяют следующим значениям безразмерных критериев:  $\gamma \sim 10^2$ ,  $Sh < 10^{-4}$ ,  $\text{Re} \sim [10^1; 10^2]$ ,  $\text{Pr} \sim [10^2; 10^3]$ ,  $Ec \sim 10^{-3}$ ,  $\vartheta \sim 10^{-4}$  можно определить вклад всех слагаемых и исходное уравнение записать в упрощенном виде:

$$\vartheta \hat{V}_1 \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_1} + \psi \frac{\hat{V}_2}{\hat{\beta}_1 + \gamma} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_2} + \eta \hat{V}_3 \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_3} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{\beta}_1^2} + \frac{Ec}{\text{Re}} \left( \left( \frac{\partial \hat{V}_2}{\partial \hat{\beta}_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \hat{V}_3}{\partial \hat{\beta}_1} \right)^2 \right).$$

В данном случае значимыми являются все слагаемые конвективной части, процесс теплопроводности происходит преимущественно в радиальном направлении, а в диссипативной части компоненты тензора скоростей деформации являются значимыми только по толщине слоя.

Таким образом, проводя оценку безразмерных критериев, можно оценить значимость тепловых эффектов и получить приближенные уравнения теплового баланса.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ № 14.Z56.17.1643 — МК.*

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Просекова А.В.<sup>a</sup>

## Границы учета параметра шероховатости при моделировании работы роторно-опорного узла на базе подшипника скольжения

Одной из перспективных задач машиноведения является повышение точности расчета и моделей процессов, протекающих при работе технических систем. В этом случае актуальным становится вопрос о необходимости учета целого ряда показателей при определенных параметрах функционирования системы. При рассмотрении работы роторно-опорных узлов на базе подшипников скольжения принято считать опорные поверхности идеально гладкими. Однако, подшипник скольжения как и вал, как объекты реального мира не идеальны – их поверхности шероховаты, форма опорных поверхностей не является идеальным цилиндром, а сечение – круглым и т.д. Наличие неровностей на опорных поверхностях приводит к непостоянству величины радиального зазора, что будет отражаться на характеристиках работы как узла, так и машины в целом. В связи с этим важной становится задача определения характеристик функционирования системы, при которых необходим учет неровностей опорных поверхностей. При исследовании данного вопроса был использован инженерный подход к описанию шероховатости, т.е. искусственно увеличивая и уменьшая площадь контакта шероховатых опорных поверхностей от линии, по которой проходит идеальный контур. Разработанная модель работы подшипника скольжения в режиме жидкостного трения с учетом высоты неровностей опорных поверхностей численно решена с использованием методов конечных разностей. Результаты исследования показали, что неровности опорной поверхности можно не учитывать, если соотношение высоты микронеровности к величине радиального зазора не превышает 0,015, так как изменение базовых интегральных характеристик при изменении высоты неровности на 1 мкм незначительно. С увеличением эксцентриситета и высоты неровностей происходит значительное увеличение несущей способности, расхода смазочного материала и потерь мощности на трение. Для малых и средних значений величин зазора в посадке опорного узла изменение высоты неровностей на 1 мкм приводит к значительному изменению несущей способности, расходу смазочного материала, потери мощности на трение.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Шакулин О.П.<sup>b</sup>

## О кинематике механизмов

В начале двадцатого века (1916 г.) русский учёный, профессор Санкт-Петербургского Политехнического института Л.В. Ассур опубликовал монографию «Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации». В этой работе он показал возможность расчленить сложный механизм на простые части (группы звеньев) с нулевой степенью подвижности. Эти группы звеньев впоследствии были названы группами Ассура. Он показал способ формирования этих групп, предложил для них отдельную классификацию и разработал методы кинематического исследования для каждого отдельного класса этих групп. Идея оказалась настолько плодотворной, что и сегодня в 21 веке используется для кинематического анализа механизмов, и стала классикой их структурного анализа.

В частности на кафедре «Мехатроники, механики и робототехники» ОГУ имени И.С. Тургенева» разработан программный комплекс в системе MatLab для кинематического анализа плоских механизмов. В основу положены идеи, выдвинутые Л.В. Ассуром. Кинематический анализ проводится для каждой структурной группы Ассура. В соответствии с формулой строения механизма формируется структура механизма, то есть последовательность соединений в

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

механизме групп Ассура. В соответствии с этой последовательностью, первая группа Ассура получает входные параметры от ведущего звена, а последующие – от предыдущей группы. По завершению анализа на выходе получаем аналоги угловых скоростей и ускорений звеньев механизма, а также аналоги линейных скоростей и ускорений кинематических пар и некоторых других точек.

В дальнейшем профессором В.В. Добровольским была предложена идея о делении механизмов на пять основных родов. Это позволило применить однотипные методы исследования механизмов, относящихся к одному роду. Академик И.И. Артоболевский показал, что могут быть построены механизмы, которые имеют поступательное и два вращательных движения и указал, какие новые винтовые пары для этого потребуются.

И в наше время развитие теории механизмов происходит небывалыми темпами. В связи с требованиями развития машиностроительной индустрии и совершенствования средств и методов обработки деталей сложной формы появилось технологическое оборудование, использующее принципы мехатроники. Роботы-станки с параллельной кинематикой выполняют обработку деталей сложной геометрии с более высоким быстродействием по сравнению с обычным оборудованием. Они используются для обработки лопаток турбин, носовых обтекателей для реактивных двигателей и ракет и других изделий сложной геометрии. Например, робот-станок с параллельной кинематикой (гексапод) обеспечивает шесть степеней свободы выходному звену, обладает высокой точностью позиционирования и предназначен для выполнения различных технологических операций. Задачи кинематики роботов с параллельной структурой чрезвычайно актуальны. И здесь большой научный вклад вносит школа д.т.н., проф. Л.А. Рыбак. Ими, в частности, синтезирован нейросетевой алгоритм управления движением выходного звена робота-гексапода, основанный на решении прямой задачи кинематики путем аппроксимации нейросетевыми функциями выборки, полученными из аналитического решения обратной задачи кинематики. Разработана также математическая модель определения оптимальной траектории выходного звена, основанная на критериях минимизации величины изменения длины приводного стержня и расхода энергии, затраченной электроприводом с учетом монотонности изменения длины при согласованной работе шести приводов.

**Чернышев В.И., Савин Л.А., Фоминова О.В.<sup>а</sup>**

### **Управление динамическими процессами в системе «ротор-опоры»**

Управление динамическими процессами в системе «ротор-опоры» применяется для того, чтобы обеспечить приемлемые уровни амплитуд линейных и угловых колебаний ротора. Поскольку ротор относится к объектам гироскопического типа – это быстро вращающееся симметричное тело, ось вращения которого может изменять свое направление в пространстве, то естественно, что данное обстоятельство должно учитываться при разработке собственно математических моделей и соответствующих оптимальных алгоритмов управления.

При разработке математической модели ротора, как правило, приходится преодолевать определённые трудности, которые в основном связаны с высокой размерностью изучаемого объекта и с проблемой адекватного описания внешних силовых факторов. Кроме того, требуется также решение комплекса задач по обоснованию выбора компенсационных воздействий и имитирующих их управлений.

Была принята базовая модель ротора, которая позволяет описать пространственное движение шарнирно опертого ротора на упругодемпфирующих опорах посредством кинематических и динамических уравнений Эйлера. В качестве компенсационных воздействий, имитирующих управления, приняты моменты (управляющие моменты) относительно инерциальной системы отсчета.

Ротор относится к классу динамических объектов, в фазовом пространстве которых изображающая точка описывает периодически замкнутые фазовые траектории. Это свойство должно сохраняться при любом допустимом управлении. Для объектов данного класса можно

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

применить прямой метод последовательной (пошаговой) реализации принципа минимума для нахождения оптимального управления динамическими процессами.

В результате применения минимаксной процедуры установлены оптимальные законы изменения управляющих моментов, которые обеспечивают минимизацию углового отклонения собственной оси вращения ротора в относительном движении. Установлено, что при ограниченной мощности управляющих моментов они изменяются по релейному закону синхронно со сменой знака соответствующих радиальных перемещений ротора. Причем с увеличением собственной скорости вращения ротора интервалы релейных переключений также увеличиваются. Особенностью исследуемой системы «ротор-опоры» является то, что существуют некоторые пороговые значения управляющих моментов – если «релейные» значения управляющих моментов меньше пороговых, то устраняются последствия нутационных флуктуаций, а если больше, то можно существенно уменьшить амплитуды прецессионного движения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 16-19-00186 «Планирование оптимальных по расходу энергии траекторий движения роторов мехатронных модулей в средах сложной реологии».

Корнеев Ю.С., Корнеева Е.Н., Гордон В.А.<sup>а</sup>

### Задача профилирования регулирующего диска пускозащитной муфты

Пускозащитные муфты [1] нашли широкое применение в машиностроении благодаря простоте и надежности работы, а правильный выбор профиля регулирующего диска позволяет получить требуемый закон движения рабочего органа технологической машины.

Форму рабочей поверхности регулирующего диска целесообразно выбирать из условий оптимального закона разгона машины, который должен задаваться из условия наименьших динамических нагрузок, а также заданного времени включения муфты.

Оптимальные законы разгона приведены на рисунке 1.

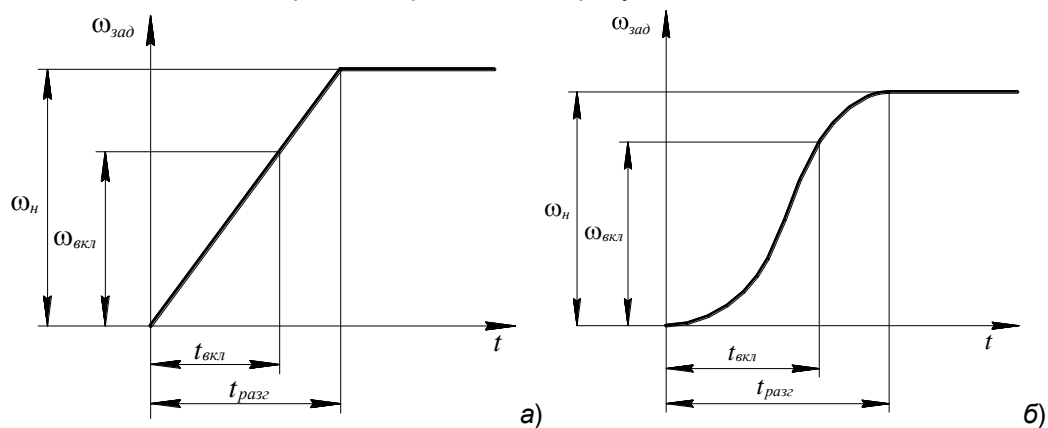


Рисунок 1 – Закон разгона ротора электродвигателя: а) угловая скорость изменяется по прямой; б) угловая скорость изменяется по синусоидальному закону

Для случая 1,а требуемая скорость меняется по закону:  $\omega_{зад} = \frac{\omega_{вкл}}{t_{вкл}} t$ , а для случая 1,б

$$\text{скорость выразим в виде: } \omega_{зад} = \omega_{вкл} \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{t_p}}{1 - \cos \frac{\pi t_{вкл}}{t_p}}.$$

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Профиль регулирующего диска необходимо выбрать таким образом, чтобы действительная скорость разгона ротора электродвигателя была близка к заданной. Для решения этой задачи воспользуемся теорией квадратичного приближения функции. Как известно из [2], для

этого необходимо найти минимум следующего функционала: 
$$\Phi = \int_0^{t_{вкл}} (\omega_{зад} - \omega_1)^2 dt.$$

Минимум функционала (1) можно найти путем составления и решения уравнений Эйлера для вариационной задачи [3]. Поскольку точного решения заданная вариационная задача не имеет, то воспользуемся приближенным решением по методу Рунге [3]. В этом случае значения функционала надо рассматривать не на произвольных кривых данной задачи, а на некоторых линейных комбинациях заданной последовательности координатных функций, удовлетворяющей граничным условиям.

Пусть, например, для профилирования выбрана дуга окружности, которую представим в параметрическом виде:  $x = b + R \sin \psi$ ;  $y = a - R \cos \psi$ ;

Тогда угловая скорость  $\omega_1$  при безнагрузочном разгоне электродвигателя находится из уравнения: 
$$I_n \frac{d\omega_1}{dt} = k_2 \omega_1 + k_1 - D - f'_A \left[ F_{\min} + 0,5 c_1 R \left( \frac{\Psi_1 t}{t_1} \right)^2 \right] \left( R_0 + R \frac{\Psi_1 t}{t_1} \right),$$
 решение которого

принимает вид:

$$\omega_1 = \frac{1}{I_n} \left\{ f'_A F_{\min} R \frac{\Psi_1}{t_1} \frac{I_n}{k_2} t + 0,5 f'_A c_1 R R_0 \frac{\Psi_1^2}{t_1^2} \left( \frac{I_n}{k_2} t^2 + \frac{2 I_n^2}{k_2^2} t \right) + 0,5 f'_A c_1 R^2 \frac{\Psi_1^3}{t_1^3} \left( \frac{I_n}{k_2} t^3 + \frac{3 I_n^2}{k_2^2} t^2 + \frac{6 I_n^3}{k_2^3} t \right) \right\};$$

При уточненном расчете следует величину  $R$  найти из следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (I_n + E x^2) \frac{d\omega_1}{dR} = k_1 + k_2 \omega_1 - f'_A (F_{\min} + c_1 y) x - D; \\ \int_0^{t_1} (\omega_{зад} - \omega_1) \frac{d\omega_1}{dR} dt = 0; \\ \cos \Psi_1 = \frac{R - y_1}{R}; \\ \omega_{зад} = \frac{\omega_{вкл}}{t_{вкл}} t, \text{ или } \omega_{зад} = \omega_{вкл} \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{t_p}}{1 - \cos \frac{\pi t_{вкл}}{t_p}}; \\ x = R_0 + R \sin \frac{\Psi_1 t}{t_1}; \\ y = R - R \cos \frac{\Psi_1 t}{t_1}. \end{array} \right.$$

Последнюю систему уравнений можно решить только приближенно с использованием компьютерных программ.

Литература

1. Корнеева, Е.Н. Динамика безнагрузочного разгона механической пусковой муфты, применяемой в приводах транспортных машин // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт» / Е.Н. Корнеева, В.А. Гордон - Орел: ОрелГТУ 2008, № 1/17 (542).- С. 75-84.
2. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
3. Эльсгольц Л.Э. Вариационное исчисление. – М.: КомКнига, 2006. – 205 с.



Шевелев А.В.<sup>a</sup>

## Лепестковый газодинамический подшипник с активным управлением

В современных роторных агрегатах (насосы, компрессоры, двигатели, детандеры, центрифуги и т.п.) находят применение лепестковые газодинамические подшипники (ЛГДП), которые обеспечивают высокие динамические качества и энергоэффективность в высоких диапазонах частот вращения. Для совершенствования опор роторов помимо технологических приёмов используются системы активного управления режимами функционирования, которые позволяют контролировать рабочие параметры роторных систем и корректировать их посредством исполнительных механизмов. Для ЛГДП управление динамическими характеристиками возможно путём изменения жёсткости упругих элементов с использованием пьезоэлектрических, электромагнитных и других видов актуаторов. Управление режимами функционирования позволяет снизить уровень вибраций ротора, приводящий к изменению КПД и износу элементов.

Объектом исследования в данной работе является мехатронный газодинамический подшипник с пьезоэлектрическим исполнительным механизмом. В измерительно-информационную систему входят элементы: датчики перемещений и АЦП. Система управления включает микропроцессор или вычислительное устройство, реализующее заданный закон управления. Теоретические исследования рассматриваемого объекта основываются на совместном решении уравнения движения и модифицированного уравнения Рейнольдса для давления, а также функции радиального зазора между ротором и упругими элементами. Следующий этап моделирования предполагает использование уравнения энергии для учёта влияния температуры на теплофизические параметры. Газодинамические реакции подшипника определяются путём интегрирования полей давления в смазочном слое. Система управления реализует процесс П-регулирования и представляет собой двух-контурную систему. Экспериментальная проверка разработанной модели осуществляется с использованием установки, включающей в себя электродвигатель, частотный преобразователь, датчики перемещения, вибрационный насос, датчики давления, сервоклапаны и т.д. Информационно-управляющая система экспериментальной установки включает в себя функционал сбора и обработки экспериментальных данных, а также САУ АГСДП. Программная реализация указанного функционала осуществлена в среде визуального программирования LabVIEW.

Сытин А.В., Родичев А.Ю., Кульков А.И.<sup>b</sup>

## Биметаллические лепестковые газодинамические подшипники с биморфными пьезоэлектрическими лепестками

В настоящее время роторные системы являются ключевыми элементами в механике. К ним предъявляется ряд обязательных требований, а именно: уменьшение размера, веса, повышенные требования к надёжности и эффективности использования, высокая устойчивость к вибрации и т.д. Наиболее уязвимым и в то же время наиболее важным элементом механизма вращения является подшипниковый узел, который больше всего загружен во время работы устройства.

Подшипники скольжения, являются стандартными элементами роторных систем. В каждом конкретном случае требуются предварительные расчеты для выбора типа подшипника, геометрических параметров и смазки. Тем не менее, существует проблема, связанная с возникновением ситуаций, не предусмотренных в процессе проектирования, которые приводят к сбоям в работе опорного узла ротора и турбомашин в целом.

Одним из самых современных и перспективных способов защиты узлов различных механизмов от интенсивного износа является использование антифрикционных покрытий с мелкими частицами твердых смазочных материалов, равномерно распределенных в смеси

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

связующих элементов и растворителей. Такие материалы включают в себя биметаллический слой, состоящий из двух или более металлов и сплавов. Использование подобных композиций дает возможность повысить надежность и долговечность деталей.

Механизм действия антифрикционных покрытий заключается в следующем. После полимеризации связующие и смазочные элементы заполняют полости микронеровностей поверхности и увеличивают ее опорную площадь. В процессе трения некоторые из смазывающих частиц переносятся на сопряженные поверхности. В этом случае они образуют гладкое скольжение и защиту антифрикционной пленки. Такие антифрикционные покрытия изготавливаются на основе дисульфида молибдена, графита, политетрафторэтилена, а также композиций различных твердых веществ, содержание которых в зависимости от типа покрытия может достигать 70%. Сухие смазки в покрытиях обеспечивают необходимый комплекс свойств.

Развивающимся направлением в области пьезоактуаторов является использование комбинированных гибких элементов, содержащих пластинчатые металлические слои и пьезокерамику. Сочетание таких элементов является изгибным пластинчатым приводом или биморфом. Есть два типа биморфов: параллельные и последовательные. В параллельном направлении поляризации пластин одинаково. Это определяет высокую чувствительность и способность использовать для контроля напряжения смещения, которые генерирует электрическое поле параллельно направлению поляризации, тем самым снижая риск деполяризации. В последовательном биморфе направление поляризации пластин противоположно. Чтобы избежать деполяризацию максимальное электрическое поле ограничено до нескольких сотен вольт на миллиметр толщины.

Внедрение мониторинга и активного контроля в роторно-опорных узлах будет решать проблему возникновения непредвиденных ситуаций путем изменения формы радиального и осевого зазора, а также путем изменения жесткости упругой опорной поверхности. Кроме того, активный контроль сможет расширить сферу использования подшипников скольжения.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

### **Направление III: Проблемы инженерного образования**

Букалова Г.В.<sup>a</sup>

## Концептуальная модель нормирования результата образования инженерного профиля

Импульс развития научно-педагогического знания в области инженерного образования связан с проникновением культуры стандартизации в современную академическую реальность. Образовательный стандарт представляет собой «некоторый набор конвенциональных норм, устанавливающих определенные параметры образования». Образовательная норма – это декларируемая вузом профессиональная компетентность выпускника.

Внедрение нормирования результата образования связано с концептуальным изменением методологии инженерной подготовки и обновлением соответствующей ей образовательной практики. Образовательная норма является информационным носителем требований сферы профильного производства и общества к результату инженерного образования. Последовательное рассмотрение образовательной нормы в контурах социологии, психологии труда, философии, логики, педагогики позволило раскрыть полноту полисемантической сущности этого феномена и разработать следующие авторские концепции образовательного нормирования:

- использования норм профильной профессиональной деятельности в качестве основы структурной целостности нормы результата инженерного образования;
- системности функций образовательного нормирования, обусловленных социальной природой образовательной нормы;
- оптимизации структурного состава образовательной нормы, основывающейся на положениях деонтической логики;
- формирования этической сферы образовательной нормы, построенной на теоретико-методологических основаниях деонтологии (этики долга) и актуализирующей ценностные аспекты инженерного образования.

В настоящее время для практической образовательной деятельности представляется сформированный концептуальный формат стандарта образования по определенному направлению (специальности). Однако, наряду с этим актуальна практика внутривузовского нормотворчества, связанная с формированием национально-регионального компонента стандарта образования по конкретному профессиональному направлению (специальности). Методологический аппарат образовательного нормирования, раскрывающий его практико-ориентированный проектный потенциал, включает: принципы обеспечения прогностичности образовательных норм; принципы использования образовательной нормы как основы интегративности образовательного процесса подготовки, иницирующей и обеспечивающей интеграционные процессы между образовательным учреждением и профильным бизнес-сообществом; принципы выявления сущностных характеристик профильной производственной деятельности как содержательной основы образовательных норм.

На основе экспериментального исследования установлено, что разработанные концептуально-теоретические и системно-методологические основания образовательного нормирования обладают потенциалом поддержки качества образования в контурах функционирования и развития инженерной подготовки.

Космынин А.В., Чернобай С.П.<sup>b</sup>

## О трудоустройстве выпускников вузов

Образование является важнейшей сферой социальной жизни, поскольку формирует интеллектуальное, культурное, духовное состояние общества. В образовательных учреждениях

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

осуществляется передача знаний, моральных устоев и обычаев общества.

Качество образования определяется качеством носителя знаний (профессорско-преподавательского состава), который передает эти знания с помощью различных методик потребителям. В зависимости от фундаментальности полученных знаний потребители могут: выдержать конкурсные экзамены при поступлении в вуз; пройти конкурсный отбор при устройстве на работу.

Конкурентоспособность выпускников на рынке труда отражают показатели: продолжительность времени трудоустройства на работу по специальности после окончания вуза; отношение количества выпускников, получивших работу по специальности, к общей численности выпускников соответствующего года [2].

Степень трудоустройства выпускника является одним из показателей качества образовательного процесса в большинстве образовательных учреждений высшего образования.

Для каждого выпускника главным является трудоустройство. Трудоустройство – главный критерий конкурентоспособности выпускников. Оно зависит в первую очередь от востребованной на рынке труда специальности.

Любой рынок имеет емкость, т.е. количество услуг или товаров, которое на рынке будет продано. Рынок труда имеет свою емкость – это каждый конкретный момент, определяемый спросом экономически активного населения на рабочие места и наличием таких рабочих мест во всех секторах экономики.

Основываясь на вышеизложенных фактах, можно выделить две главные группы проблем, с которыми сталкивается рынок труда молодых специалистов [1]:

1. Низкая конкурентоспособность выпускников по сравнению с другими возрастными группами (отсутствие жизненного и профессионального опыта, зачастую расплывчатое представление студентов о будущей профессии, недостаточная информированность о внутреннем устройстве различных организаций, недостаточная информированность о ситуации на рынке труда и о возможных способах поиска работы, нередко завышенная самооценка студента).

2. Отсутствие детального и систематического изучения и анализа рынка труда и координации в подготовке кадров. Вследствие этого значительная часть выпускников работает не по специальности, снижая тем самым уровень своей первоначальной квалификации.

Наиболее важной характеристикой в структуре конкурентоспособности молодых специалистов, по мнению большинства руководителей – это владение современными IT-технологиями. Особенно важно это для предприятий и организаций деловой сферы. Это закономерное требование связано с развитием техники и технологии современного производства, и как следствие, повышение значимости компьютерного оснащения производства, рабочих мест.

Следовательно, в структуре конкурентоспособности молодого специалиста, прежде всего, выделяют наличие профессионального образования, при этом в промышленности и социальной сфере необходимо иметь профильное образование.

Наименее значимыми в предложенном списке профессиональных характеристик оказались престижность диплома и наличие диплома с отличием. В действительности, эти характеристики в глазах работодателей, особенно в социальной сфере, промышленности, деловых услуг, могут быть даже неплохой рекомендацией при приеме на работу молодого специалиста. Однако, они, скорее всего, свидетельствуют не столько о качестве полученного образования, сколько об организационных, психологических и определенных интеллектуальных способностях молодого специалиста.

Таким образом, сравнительный анализ оценок руководителями молодого специалиста без опыта работы и с опытом работы по специальности показал, что большинству современных организаций на место специалиста требуется «классический» рядовой исполнитель».

#### Литература

1. Космынин А.В., Смирнов А.В. Проблемы участия работодателей в процедуре оценки качества образования // Успехи современного естествознания. – 2011. – №12. – С. 69–70.

2. Космынин А.В., Чернобай С.П. Перспективы профессионального образования в подготовке конкурентоспособных специалистов вуза // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – №4. – С. 10–11.

Калекин А.А.<sup>a</sup>

## Методологические и организационные проблемы довузовской инженерной подготовки школьников

Технологическая революция XXI века, связанная с интенсивным развитием и использованием нанотехнологий, робототехники, биотехнологий и других перспективных технологий требует формирования в нашей стране, начиная с общешкольного образования, научно-технологического потенциала, адекватного современным вызовам мирового технологического развития.

Научно-педагогический опыт в области трудового обучения и воспитания школьников инициировал разработку концепции технологического образования, реализующейся в общеобразовательном предмете «Технология».

Важную роль в решении проблем кадрового обеспечения экономики в инженерах и квалифицированных рабочих играет предметная область «Технологии» в школе. Это фактически единственный школьный курс, отражающий в своем содержании общие принципы преобразующей деятельности человека и все аспекты материальной культуры. Он направлен на овладение учащимися навыками конкретной предметно-преобразующей (а не виртуальной) деятельности, создание новых ценностей, что, несомненно, соответствует потребностям развития общества. В рамках «Технологии» происходит знакомство с миром профессий и ориентация школьников на будущую работу в различных сферах материального производства. Тем самым обеспечивается преемственность перехода учащихся от общего к профессиональному образованию и трудовой деятельности.

Ведущим педагогом в технологическом образовании и профессиональном самоопределении школьников, особенно в сфере современного материального производства, стоит учитель технологии (ныне бакалавр, магистр).

Учитель технологии в вузе получает необходимую подготовку, названной нами технологической отраслевой, куда входят общетехнические и технологические дисциплины отраслей производства своего региона, базирующихся при их изучении на инженерной педагогике. В последнее время в школах в рамках «Технологии» рассматривается также образовательная робототехника на конструкторах LEGO.

Анализ самоопределения выпускников школ, получивших от учителей отраслевую технологическую подготовку на базе инженерной педагогике, показал на увеличение спроса технических специальностей в техникумах и вузах нашего региона.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

Левый Д.В., Лакалина Н.Ю.<sup>b</sup>

## Опыт реализации инженерного образования в центре молодежного инновационного творчества «Техномир» БГТУ

В последнее время всё более остро становится вопрос о нехватки квалифицированных технических кадров. Чтобы повысить популярность инженерного образования необходимо решать вопросы о мотивации заинтересованности в получении технического образования. Для повышения заинтересованности в получении молодежью инженерного образования, необходимо в процессе обучения решать задачи повседневной жизни с практической реализацией. Поэтому стал вопрос о создании центра, в котором молодежь смогла бы реализовывать свои технические проекты.

<sup>a</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

<sup>b</sup> Брянский государственный технический университет



На базе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» в 2016 году был образован Центр молодёжного инновационного творчества «Техномир». Желание участвовать в работе ЦМИТа студенты проявили сами с большим энтузиазмом, их заинтересовала данная тематика новизной и возможностью воплотить в реальности свои разработки. ЦМИТ располагает 3D-сканером, 3D-принтером (FDM-печать пластиком), поэтому разработки направлены на проектирование изделий, которые в дальнейшем будут распечатаны на 3D-принтере.

Первой разработкой был прототип человеческой руки, обеспечивающей базовые движения человеческой кисти. За основу был взят открытый проект InMoov который предоставляет в свободном доступе готовые решения для 3D-печати различных частей человеческого тела. Были напечатаны на 3D-принтере и собраны необходимые элементы кисти и предплечья. Эта разработка позволит выполнять различные опасные операции без вреда для здоровья. Например, на научных объектах, с опасными радиационными, гамма, альфа и другими излучениями. При работе со школьниками демонстрация работы механизированной руки робота позволяет повысить их интерес к техническим направлениям образования.

В дальнейшем была проделана работа по разработке изделий для развития моторики рук детей школьного и дошкольного возраста. Изучив существующие тренажеры и игрушки для реабилитации, было принято решение о создании игрушки-тренажера «Пирамидка» с кольцами разных размеров, разных цветов, имеющая рифления на поверхности для развития нервных окончаний на пальцах рук, а также с резьбой на стержне, которая помогает развивать кисть руки. Во время игры с пирамидкой дети знакомятся с такими понятиями, как форма, цвет и размер предмета.

Также пирамидка помогает в развитии: мелкой моторики, логики, координации, внимания. С помощью пирамидки дети учатся собирать целый предмет из отдельных деталей, быстрее восстанавливают опорно-двигательный аппарат, развивают нервные окончания пальцев рук, что благоприятно действует на весь организм. Для развития моторики также были спроектированы и изготовлены изделия «Эспандер кистевой» и «Движущаяся платформа». Для оценки эффективности разработок сотрудники ЦМИТа «Техномир» с рабочим визитом посетили Реабилитационный Центр «Озерный». В рамках визита реабилитационному центру были подарены спроектированные и напечатанные на 3D-принтере участниками ЦМИТ «Техномир» модели «Эспандер» и «Пирамидка», а также представлена «Подвижная платформа», которой мог поуправлять любой желающий. Подаренные игрушки были с удовольствием опробованы детьми (рисунок 1).



Рисунок 1 – Апробация работы изделий разработанных ЦМИТ «Техномир»

С 2016 года в ЦМИТе «Техномир» проводятся занятия со школьниками старших классов по направлениям «3D-прототипирование» и «Робототехника», в которых проводится обучение по работе на 3D-сканере, 3D-принтере, а также школьники программируют платы. По итогам работы

вручаются сертификаты и модели, разработанные в рамках ознакомительных занятий и распечатанные на 3D-принтере.

При работе со школьниками и студентами было отмечено, что использование в образовательном процессе реальных разработок значительно повышает интерес к техническому творчеству и популяризации образования технической направленности.

**Савин Л.А., Поляков Р.Н.<sup>а</sup>**

### **Методологическое, информационное и техническое обеспечение инженерного образования: проблемы и решения**

Решение проблемы инженерного образования всё в большей степени становится важнейшим фактором социально-экономического развития, обороноспособности и конкурентоспособности государства. В настоящее время наблюдается тенденция значительного увеличения государственных вложений в научную и образовательную сферу в странах Азии. Не случайно фирмы Индии, Китая, Пакистана, Южной Кореи увеличили активность на рынке вооружений, что является отражением роста научно-технического уровня развития и наличия образовательной среды инженерной подготовки. Для России совершенствование системы технической подготовки становится одним из условий выживания в существующих границах и утверждением себя одним из лидеров технологического развития в современном мире. В докладе рассматриваются объективные факторы влияния на систему инженерного образования, а именно, идеологическое, организационное, информационное, методологическое и материально-техническое обеспечение. Определённый акцент делается на информационной составляющей, предполагающей использование в процессе проведения всех видов учебных занятий помимо медийных средств – электронных учебных комплексов, включающих базы данных учебных пособий и монографий, конспекты и презентации лекций, лабораторные практикумы, картотеку вопросов и задач, тезаурус, автоматизированную систему контроля и оценки знаний. Методология технического образования представляет собой отдельное направление совершенствования деятельности учебных заведений, предполагающее потребность в корректировке ФГОС, программ подготовки, учебных планов и рабочих программ по направлениям подготовки и отдельным специальностям на всех уровнях. Появление новых направлений подготовки специалистов, основанных на синергетическом подходе, таких как мехатроника, робототехника, автоматизация технологических процессов и производств, управление в технических системах и т.д., требуют появления на рынке образовательных услуг нового учебно-научного оборудования, оснащённого современными информационно-измерительными системами с сенсорными элементами, процессорными устройствами и высокоточными исполнительными механизмами.

Идеологический аспект инженерного образования связан с проводимой государством стратегической политикой по реализации крупных научно-технических программ и проектов, способных оказать притягивающее воздействие на молодых людей при выборе жизненной траектории. Здесь следует также отметить потребность в довузовской технической подготовке, которая может включать специализированные уроки технологии по робототехнике в школе, кружки технического творчества, проведение молодёжных научных школ, семинаров и олимпиад.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

---

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

Мищенко Е.В.<sup>а</sup>, Мищенко В.Я.<sup>б</sup>

## Особенности преподавания курса «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование»

В настоящее время обозначились новые тенденции современного производства и управления, вызванные переходом к информационному обществу и обусловленные научно-техническим прогрессом и современными экономическими формами деятельности. Новый тип экономики предъявляет новые требования к выпускникам вузов, среди которых приоритет получают требования профессиональной компетентности, формирование которой сегодня является стратегической целью высшего образования. Поэтому преподавание новых дисциплин имеет свои особенности.

Особенность обучения по направлению «Мехатроника и робототехника» в сравнении с машиностроительными, технологическими, агропромышленными и другими направлениями заключается в том, что эта междисциплинарная подготовка выпускников включает в себя элементы подготовки инженера-механика, инженера по автоматическому управлению различными объектами и процессами, инженера-электроника, специалиста по вычислительной технике и технологии, инженера-приборостроителя.

Одной из дисциплин, необходимых для подготовки бакалавров, готовых к решению задач в области мехатроники и приборостроения, современного машиностроения, умеющих разрабатывать новые технологические процессы и автоматизированное оборудование, новые методики расчета и экспериментального исследования машин, мехатронных систем и оборудования, является курс «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование». Данный курс формирует общеинженерную подготовку специалиста в области мехатроники и робототехники, его знания, умения и навыки, необходимые для последующего изучения дисциплин профессионального цикла, а также в дальнейшей его деятельности в качестве инженера-конструктора, инженера-эксплуатационника и других видах инженерной деятельности по освоению новой техники. Являясь частью раздела «Механика», курс содержит в себе основные сведения о динамике машин, деталях машин, основах конструирования элементов машин и механизмов, используемых в мехатронике и робототехнике.

Цель преподавания курса – дать обучающемуся знания об основных понятиях курса, основах синтеза и анализа различных механизмов, кинематике и динамике механизмов и машин, основах расчета и конструирования деталей и узлов, использующихся в мехатронных и робототехнических устройствах.

Во время изучения курса у обучающихся формируются следующие общетехнические компетенции:

- способность производить расчеты и проектирование отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием;

- способность разрабатывать конструкторскую и проектную документацию механических, электрических и электронных узлов мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями.

Заключительным этапом освоения дисциплины является выполнение курсового проекта. Тематика курсовых проектов выбирается исходя из специфики выполняемых НИР на кафедре. Так обучающимися выполняются проекты по разработке приводов, используемых при проектировании технологического оборудования в машиностроении, для пищевой и перерабатывающей промышленности, при разработке роботизированных экзоскелетов для верхних и нижних конечностей, беспилотных летающих аппаратов и др. Качественно выполненные обучающимися курсовые проекты являются хорошей базой для выпускной квалификационной работы.

<sup>а</sup> Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

<sup>б</sup> Юго-Западный государственный университет

Волков В.Н., Стычук А.А.<sup>а</sup>

## К вопросу о разработке электронного учебного комплекса общепрофессиональной подготовки

Современный этап развития высшего инженерного образования характеризуется высокой степенью интегрированности и взаимопроникновения различных областей науки и техники. Наблюдается устойчивая тенденция к появлению новых направлений подготовки: мехатроника, робототехника и др., объединяющие точную механику, информационные технологии, системы управления; по формированию синергетических учебных курсов, объединяющих смежные области науки и техники. В этой связи ориентированность на подготовку инженерных кадров универсальной направленности, в равной степени владеющих знаниями по конструированию технических систем, программированию информационно-измерительных систем, проектированию систем управления, а также владеющих навыками управленческой деятельности, является особо острой и актуальной задачей, неотъемлемой частью которой является использование качественных и доступных учебных материалов.

В условиях информационной открытости, развитой сети сервисов Интернет найти учебные материалы в любом формате (от текстовых до видеоуроков) не представляется затруднительным, тем более что с началом реализации приоритетного проекта «Современная цифровая образовательная среда в России» к 2025 году планируется создать условия для системного повышения качества и расширения возможностей непрерывного образования для всех категорий граждан за счет развития российского цифрового образовательного пространства. Мы же видим свою задачу в создании электронного учебника как некоего «помощника» преподавателя, а не его альтернативы. Студент в уже сейчас имеющемся многообразии электронных методических материалов, онлайн-курсов и т.п. имеет возможность расширить свои знания, в то время как электронный учебник будет аккумулировать авторские разработки, соотнесенные с традиционной формой обучения: лекционные материалы, включая презентации, задания и описание хода выполнения практических и лабораторных работ, указания по выполнению курсовых проектов и т.п.

Центральным компонентом разрабатываемого электронного учебного комплекса общепрофессиональной подготовки является репозиторий учебных объектов – централизованная база данных, которая хранит и управляет учебным контентом. Из этой точки отдельные учебные объекты доступны пользователям или как отдельные элементы или как часть в составе более крупного учебного модуля, который в свою очередь может быть частью полного курса.

Доступность, тиражируемость и мультимедийность учебного комплекса определило концепцию построения его архитектуры. Так, основным скелетом стала программная оболочка, реализованная в виде иерархии html-страниц, где структура страниц верхнего уровня определена жестко, а непосредственно контент доступен через гиперссылки. Возможность «пересобрать» учебный комплекс без использования специализированного программного обеспечения реализуется посредством использования специальных скриптов (макросов), объединяющих содержательную часть с оболочкой. Предлагаемый подход позволяет с легкостью изменять разработанный на текущем этапе дизайн – для этого понадобится лишь перерисовать основные элементы и изменить описание используемых стилей. То же самое относится и к содержанию.

Таким образом, получившаяся система является гибко настраиваемой, масштабируемой, не требует длительного обучения пользователей (разработчиков курсов), знаний языков программирования и опыта разработок в области IT, способной интегрировать различные форматы учебных материалов, полностью переносимой, т.е. для работы с ней понадобится только компьютер под управлением любой операционной системы с имеющимся браузером без установки специализированного программного обеспечения. Конечный продукт может быть доступен через Web, CD-ROM или другой носитель. Каждый объект, в зависимости от требований,

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева



может быть использован несколько раз и с различными целями. Интегрированность контента обеспечивается вне зависимости от метода доставки.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общеинженерной подготовки».*

**Черняева Е.В., Кожевникова И.Д.<sup>а</sup>**

### **Применение коммуникативно-ориентированных проектов с целью формирования готовности к иноязычному профессиональному общению у будущих инженеров транспорта**

Проблема подготовки высококвалифицированных инженеров транспорта очень актуальна на сегодняшний день. Современные выпускники должны обладать не только качественными знаниями, но и быть способными самостоятельно решать сложные профессионально-производственные и научные проблемы, должны свободно ориентироваться в информационном, в том числе иноязычном, обществе, связанном с его профессиональной деятельностью, а также быть готовыми к профессиональному общению. Поскольку, именно профессиональное общение является необходимым условием выполнения профессиональных обязанностей и непосредственно влияет на профессиональные качества специалиста, обеспечивая тем самым в значительной степени не только его конкурентоспособность, но и безопасность жизни людей.

В сфере профессиональной деятельности транспортного инженера от уровня готовности к профессиональному общению зависит обеспечение безопасности эксплуатации различных видов техники, а следовательно, безопасности жизни людей. Поэтому одной из первостепенных задач подготовки данного рода выпускника является формирование у него готовности к профессиональной иноязычной коммуникации. Эффективность данного процесса зависит от различных способов подачи и восприятия обучающего материала, но хотелось бы отметить один из наиболее действенных подходов к формированию готовности к иноязычному профессиональному общению у будущих транспортных инженеров – это создание коммуникативно-ориентированных проектов, связанных с их будущей профессиональной деятельностью. Поскольку именно повышение степени осмысленности использования учебного материала приводит к созданию стремления у обучающихся развивать не только свои творческо-поисковые способности, необходимые при выполнении проектов, но и способствует развитию их коммуникативных навыков, необходимых для будущей профессиональной деятельности.

Таким образом, для подготовки будущего инженера важно сформировать у него готовность к профессиональному иноязычному общению, а именно умение воспользоваться ею в разнообразных ситуациях общения с целью установления различного рода взаимодействия. Такое общение предполагает наличие профессионально-значимых коммуникативных умений и навыков, обеспечивающих результативность и эффективность решения будущих профессиональных задач. Одним из необходимых педагогических условий процесса формирования готовности к такому профессиональному общению является применение коммуникативно-ориентированных проектов.

**Бурлакова Е.А., Колпакова С.В.<sup>б</sup>**

### **Математика для инженерных специальностей**

В современных условиях бурного развития техники от специалистов требуется глубокое познание проблемы. Этому способствует умение правильно построить математическую модель,

---

<sup>а</sup> *Московский государственный технический университет гражданской авиации*

<sup>б</sup> *Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева*

исследовать ее с помощью законов математики. Инженеры должны уметь решать не только поставленные перед ними задачи, но и формулировать совершенно новые, требующие применения новых математических методов. Современная техника основывается как на научных экспериментальных и теоретических исследованиях, так и на опыте инженерной практики, поэтому специалисту необходимо быть в курсе значительных открытий в области математики и физики.

Перед высшим образованием стоит задача подготовки высококвалифицированных инженеров, свободно владеющих своей профессией, способных строить свою профессиональную деятельность на основе новейших достижений науки. В связи с этим студентам инженерных специальностей необходимо особое внимание уделять задачам из различных разделов механики и физики, полезных для овладения математическими методами и осмысления важности этих методов в системе естественных наук.

Применение математики необходимо также при рассмотрении статистического характера физических явлений. Специалисты по естественным наукам пользуются статистическими методами вследствие крайней сложности изучаемых ими систем, а также невозможности учесть действие многих переменных факторов. Если обслуживающий инженер желает эксплуатировать некоторую систему, он должен иметь в запасе те части, выход из строя которых наиболее вероятен. При экспериментальном исследовании поведения системы необходимо учитывать различие в поведении материалов, различие мнений экспериментаторов и разнообразие ожидаемых условий работы. Подобные соображения сводят опытные испытания к рассмотрению вероятностей.

Достижение результативности в обучении инженеров математике представляет собой комплексную задачу, решение которой зависит от особенностей взаимодействия преподавателей и студентов.

**Поляков Р.Н.<sup>а</sup>**

## **Проблематика адаптации подхода CDIO к реалиям высшего образования в России**

Современный этап развития высшего инженерного образования характеризуется высокой степенью интегрированности и взаимопроникновения различных областей науки и техники. Подготовка узкоспециализированных кадров приводит к сложностям трудоустройства, и в большинстве регионов сложилась ситуация, когда значительное количество выпускников инженерных специальностей не работают по профилю полученной квалификации. Наблюдается устойчивая тенденция к появлению новых направлений подготовки: мехатроника, робототехника, объединяющая точную механику, информационные технологии, системы управления – по формированию синергетических учебных курсов, объединяющих смежные области науки техники. Технические системы новых поколений требуют подготовки инженеров-универсалов с высокой степенью ответственности за результаты своего интеллектуального труда, так как несут в себе функции автоматизированной диагностики и активного управления, что требует применения методов искусственного интеллекта для планирования траекторий и управления движением. Поэтому ориентированность на подготовку инженерных кадров универсальной направленности, в равной степени владеющих знаниями по конструированию технических систем, программированию информационно-измерительных систем, проектированию систем управления, а также владеющих навыками управленческой деятельности является особо острой и актуальной задачей.

Одной из главных мировых тенденций развития инженерного образования является внедрение формата CDIO (Conceive – Design – Implement – Operate или Придумывай – Разрабатывай – Внедряй – Управляй), который имеет целью сокращение разрыва между образовательными программами вузов и реальными потребностями предприятий в первую

---

<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева



очередь в области подготовки инженерных кадров. Вместе с тем, формат CDIO сформировался в западных университетах, в которых существуют собственные производственные площадки, оснащенные технологическим оборудованием высокой точности и стоимости, которые обслуживает персонал соответствующей подготовки, а также существуют курирующие службы, обеспечивающие логистику материалов, комплектующих и выделение денежных средств на выпускные проекты студентов. Поэтому простое копирование данного формата к реалиям российского образования может привести к неэффективности обучения по новым стандартам и использования финансовых средств, выделяемых на приобретение оборудования. Формат обучения CDIO требует от вузов соблюдения высоких стандартов материального оснащения технологическим, экспериментальным и лабораторным оборудованием, содержания квалифицированного вспомогательного персонала и переподготовку преподавательского состава. Также необходимы площади, четкая структура компоновки оборудования, требуемые мощности электросети, то есть можно говорить о том, что учебные аудитории максимально должны подводиться под формат производственного помещения.

Более сложный и глубинный уровень подготовки инженеров универсального профиля – это участие в научно-исследовательских, опытно-конструкторских и экспериментальных разработках научного коллектива выпускающей кафедры. Выполнение НИР и ОКР требует от кафедры наличие материально-технической базы, универсального модульного оборудования с современными информационно-измерительными устройствами и программно-аппаратными средствами, наличия отлаженных коопераций с промышленными предприятиями региона. Исключительным условием реализации такого подхода является создание интегральной среды обучения, в которой студент органично и последовательно взаимодействует с преподавателями в рамках изучаемых курсов для решения реальных задач, решаемых в рамках приоритетных направлений науки и техники РФ. Только выполнение всех этих условий позволит создавать конкурентоспособные образовательные продукты на рынке образования и обеспечить выживание технических вузов.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно-методологического комплекса общепромышленной подготовки».*

Грядунова Е.Н.<sup>а</sup>

## **Применение интерактивной формы лекции в современном техническом образовании**

Развитие техники и технологий напрямую зависит от качества высшего инженерного образования. В современном обществе происходит смена парадигмы инженерного образования: от «передачи знаний» к практико-ориентированному непрерывному образованию, опирающемуся на фундаментальное теоретическое содержание. Целью образовательного процесса является формирование у студентов заданного уровня общекультурных и профессиональных компетенций. Он не только должен овладеть знаниями, которыми обладают его преподаватели, но и уметь переосмыслить их, применить на практике и доказать свою компетентность работодателю.

В настоящее время идет резкое сокращение часов на изучение теоретического материала, так дисциплины: «Теоретическая механика», «Сопротивление материалов» и «Теория машин и механизмов» объединены в одну – «Техническая механика». При этом количество лекционных часов колеблется от 16 до 20. За такое короткое время мы должны не только дать студенту прочную научную базу, но и показать связь теоретического материала с их будущей инженерной деятельностью. Использование интерактивной лекции позволяет максимально полно овладеть теоретическим материалом за ограниченное время. Существует несколько форм

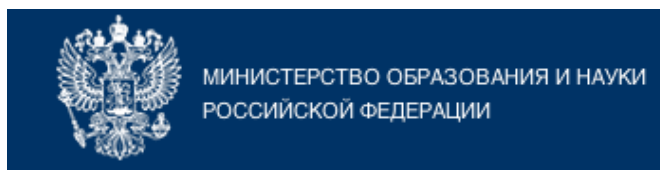
<sup>а</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

интерактивных лекций, но для первой лекции по механике целесообразно выбрать лекцию-визуализацию.

В докладе представлен разбор интерактивной лекции-визуализации по механике с применением мультимедийных технологий. Описывается использование принципа наглядности. Чтение лекции сводится к связному, развернутому комментированию преподавателем подготовленных наглядных материалов, полностью раскрывающему тему данной лекции. Обязательным является соблюдение принципов научности информации, то есть обучающийся должен усвоить общенаучные технические понятия. При этом учебная информация подается таким образом, чтобы обучающийся мог оценить ее пригодность для будущей инженерной деятельности. То есть присутствует целостный подход к подготовке будущего специалиста – информация подается с позиции интересов и основных целей обучения. В лекции используются разные виды визуализации как натуральные, так и символические, что позволяет непосредственно сравнить реальный объект и его схему.

Эффективность и целесообразность проведения первой лекции по механике в виде лекции-визуализации несомненна. Такая форма проведения занятия помогает формировать и развивать учебно-познавательную позицию студента. Подготовка интерактивной лекции требует от преподавателя не только знаний по механике, но и изучения новой промышленной техники. Для каждой специализации необходимо подобрать наглядные материалы, связанные именно с их инженерной специальностью. Кроме того, это должна быть творческая работа, способная заинтересовать и увлечь обучающего.

## ОРГАНИЗАЦИИ-ИНИЦИАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



Московский государственный  
технологический университет  
«СТАНКИН»



Санкт-Петербургский институт  
информатики и автоматизации  
Российской академии наук



Саратовский государственный  
технический университет  
имени Гагарина Ю.А.



Юго-Западный  
государственный университет



Брянский государственный  
технический университет



Научно-технический центр  
«Автоматизированное  
Проектирование Машин»



Российская инженерная  
академия



Московский автомобильно-  
дорожный государственный  
технический университет



Белгородский  
государственный  
технологический  
университет им.  
В.Г.Шухова



Орловский государственный  
университет  
имени И.С. Тургенева



## Научное издание

**Проектирование машин, роботов и мехатронных систем**  
Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции

Ответственный за выпуск – Л.А. Савин  
Технические редакторы – В.О.Тюрин, А.В. Корнаев, Д.А. Иванов  
Компьютерная верстка, макет – Д.А. Иванов, В.О.Тюрин  
Дизайн обложки – Д.А. Иванов, В.О.Тюрин

Подписано к печати 16.10.2017.  
Формат 60x84 1/8. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 8,5. Тираж 150 экз. Заказ

Издательство ОГУ имени И.С. Тургенева  
Напечатано на полиграфической базе  
ИП Иванов Даниил Александрович  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95



# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Недостаточные знания о сути объекта можно компенсировать большим количеством данных о его поведении

Точные методы познания зачастую уступают вероятностным

Альтернативой программированию становится самообучение программ

## Источники данных

### Социальная сфера

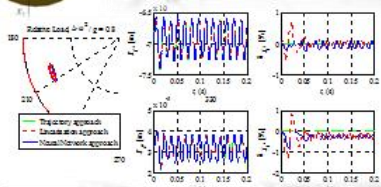
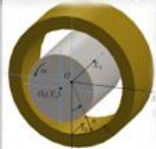
- социальные сети;
- умные устройства (телефоны, часы и др.);
- клиентские базы данных (учреждений, торговых сетей и др.);

### Техническая сфера

- датчики и устройства измерений;
- устройства фото- и видеофиксации;
- базы данных;

## Определение зависимости между массивами X и Y

Расчет динамики ротора с помощью нейронных сетей прямого распространения



## Машинное обучение

Регрессия

Классификация

Кластеризация

## Разделение на классы по заданным признакам

Выявление классов в социальных группах с помощью экспертных систем логического вывода и нейронных сетей



## Принятие решений в условиях неопределенности

Программа AlphaGo для игры в «го», основанная на глубоких нейронных сетях, превазошла мастерство человека



## Машинное зрение

Распознавание образов (пешеходов, дорожной разметки, знаков) с помощью глубоких нейронных сетей



## Художественная обработка изображений

Подражание стилю художника с помощью глубоких нейронных сетей





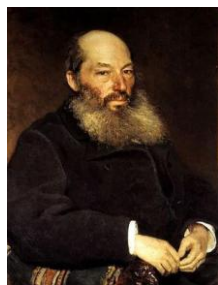
# Орел



## Писатели - орловцы



И.С. Тургенев



А.А. Фет



Н.С. Лесков



И.А. Бунин



Ф.И. Тютчев

## Ученые и инженеры Орловщины



Н.П. Петров

Основатель гидродинамической теории смазки.  
Родился в 1836 г. в Трубчевске Орловской губернии



Н.Н. Поликарпов

Авиаконструктор  
Родился в 1892 года в Ливенском районе  
Орловской области

## Промышленные предприятия



Государственный мемориальный и природный музей-заповедник И. С. Тургенева «Спасское-Лутовиново» — уникальный памятник культуры, единственный в России мемориальный музей великого русского писателя.