

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 2 (119)

Февраль

2011

**Редакционный совет:**

КУЗНЕЦОВ Н. А.  
МАКАРОВ И. М.  
МАТВЕЕНКО А. М.  
ПЕШЕХОНОВ В. Г.  
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.  
ФЕДОРОВ И. Б.

**Главный редактор:**  
ТЕРЯЕВ Е. Д.

**Заместители гл. редактора:**  
ПОДУРАЕВ Ю. В.  
ПУТОВ В. В.  
ЮЩЕНКО А. С.

**Выпускающий редактор:**  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

**Ответственный секретарь:**  
ПЕТРИН К. В.

**Редакционная коллегия:**

АЛЕКСАНДРОВ В. В.  
АНТОНОВ Б. И.  
АРШАНСКИЙ М. М.  
БОГАЧЕВ Ю. П.  
БУКОВ В. Н.  
ВИТТИХ В. А.  
ВОСТРИКОВ А. С.  
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.  
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.  
ИВЧЕНКО В. Д.  
ИЛЬЯСОВ Б. Г.  
КАЛЯЕВ И. А.  
КОЛОСОВ О. С.  
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.  
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.  
КУЗЬМИН Н. Н.  
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.  
ЛЕОНОВ Г. А.  
ЛЁВИН Б. А.  
ЛОХИН В. М.  
НОРЕНКОВ И. П.  
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.  
РАПОПОРТ Э. Я.  
РАЧКОВ М. Ю.  
РЕЗЧИКОВ А. Ф.  
СЕБРЯКОВ Г. Г.  
СИГОВ А. С.  
СИРОТКИН О. С.  
СОЙФЕР В. А.  
ТИМОФЕЕВ А. В.  
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.  
ФУРСОВ В. А.  
ХИМЕНКО В. И.  
ЮРЕВИЧ Е. И.  
ЮСУПОВ Р. М.

**Редакция:**

БЕЗМЕНОВА М. Ю.  
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.  
ЧУГУНОВА А. В.

## СОДЕРЖАНИЕ

Специальный выпуск, посвященный 60-летию кафедры  
"Мехатроника и робототехника" Балтийского государственного  
технического университета "Военмех" им. Д. Ф. Устинова

### РОБОТОТЕХНИКА

Юревич Е. И. Фундаментальные задачи робототехники . . . . .	2
Лопота В. А., Потапов А. М., Градовцев А. А., Каргов А. И., Даляев И. Ю. Транс- портно-манипуляционная система для обслуживания Международной космической станции и поддержки внекорабельной деятельности космонавтов. . . . .	6
Немцев Е. М. Применение платформы QNX для цифрового адаптивного нейросетево- го управления приводами робота PUMA-560. . . . .	17
Александров В. В., Кулешов С. В. Цифровая программируемая технология управле- ния робототехническими комплексами . . . . .	21

### ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Новоселов Б. В. Новые подходы в проектировании регулируемых приводов. . . . .	25
Шароватов В. Т., Лощицкий П. А. Математическая модель силового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия оболочкового типа . . . . .	30
Коршунов А. И. Частотный пуск синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе . . . . .	37
Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В. Современное состояние и перспективы разви- тия мехатронных систем с вентильными электрическими машинами . . . . .	43

### ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Потапов А. М., Гуцин М. А. О связи показателей качества систем автоматического управления во временной, частотной и корневой областях . . . . .	50
Кулик В. И., Кулик А. В., Загашвили Ю. В., Орыщенко А. С. Моделирование газо- фазных процессов получения композитов с углеродной и керамической матрицами . . . . .	54
Коротков Е. Б., Левинзон Г. Л., Мороз А. В. Стабилизация и виброгашение обору- дования для нанотехнологий . . . . .	61
Васильков Д. В., Кочина Т. Б., Александров А. С. Учет контактных взаимодействий в подвижных и неподвижных соединениях звеньев технологических машин в зада- чах динамики и управления . . . . .	68

### ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

Подготовка кадров и научно-техническое сотрудничество между ГНЦ РФ ЦНИИ робо- тотехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК) и кафедрой "Мехатроника и ро- бототехника" БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова . . . . .	74
Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Клещенко М. С. Концепция дистанционно- го обучения на кафедре "Мехатроника и робототехника" . . . . .	75
Contents . . . . .	79

*Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для  
публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени  
доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса  
научного цитирования*

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mech@novtex.ru](mailto:mech@novtex.ru)

УДК 621.865.8

**Е. И. Юревич**, д-р техн. наук, проф.  
ЦНИИ РТК  
kafedra@rtc.ru

## Фундаментальные задачи робототехники

*Показано, что современная робототехника является одним из важных направлений развития идей кибернетики, одним из полигонов их отработки и практической реализации. Обсуждаются фундаментальные задачи робототехники: создание "разумных" роботов методом самоорганизации, миниатюризация и реконфигурируемость роботов, интеграция и оптимизация их взаимодействия с людьми.*

**Ключевые слова:** кибернетика и робототехника, "разумные" роботы, миниатюризация и конфигурируемость роботов

Для робототехники научной основой стали идеи кибернетики, причем не столько достаточно тривиальный тезис об общности информационных процессов в живом мире и технике, сколько непосредственно вытекающее из него положение о необходимости учиться у живых существ, которое сразу же развилось в отдельный раздел кибернетики — бионику.

Соответственно, с самого начала в развитии робототехники определились две, правда, вначале довольно слабо связанные цели — прикладная и фундаментальная. Прикладная цель была объективно обусловлена развитием современного производства с переходом к комплексной гибкой автоматизации. Одной из первоочередных задач для этого направления стало создание выявленного в ходе этих работ недостающего звена в перечне компонентов таких производств, которое должно заменить человека, выполняющего различные манипуляционные операции — основные технологические и вспомогательные. Из этой задачи выделилась отдельная, направленная на освобождение людей от занятий опасными и вредными работами. Затем по мере развития робототехники, естественно, возникла задача создания средств робототехники, предназначенных для работ, которые принципиально не могут выполняться с помощью или даже просто в присутствии людей (дальний космос, глубины океана, военное дело, новые интенсивные технологии и т. д.). Возникли экстремальная робототехника, медицинская микроробототехника, биоробототехника, шагающие машины и другие специальные разделы робототехники. Появилось роботостроение на базе международной кооперации и специализации.

Постепенно сложились основные принципы построения, проектирования и применения средств робототехники и созданных на их основе технических систем. Определелись главные области применения робототехники, базирующиеся на реальных технических и экономических характеристиках этой техники.

Принципиальный вопрос: по какому пути идти робототехнике — в сторону повышения универсальности роботов или, наоборот, в сторону их специализации, — разрешился разработкой модульного принципа их построения. Заманчивая идея создания сравнительно небольшого семейства универсальных роботов, близкая их прототипу — человеку, была заменена идеей универсального набора компонентов роботов — модулей, из которых можно оперативно собирать любые роботы, оптимально ориентированные на конкретное применение.

Сегодня роботы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, а уровень робототехники является важным показателем научно-технического, промышленного и оборонного потенциалов каждой страны [1].

Вторая, фундаментальная цель робототехники — это экспериментальное изучение и воспроизведение феномена разумного поведения живых существ и, прежде всего, человека. В настоящее время эта проблема развилась в самостоятельное междисциплинарное научно-техническое направление, получившее в русскоязычной литературе название "искусственный интеллект".

Рис. 1 иллюстрирует принципиальное различие информационных систем живых организмов и технических систем. Естественный разум человека оперирует двумя видами информации — образной и вербальной. На основе образной информации в правом полушарии головного мозга происходит до 90 % мыслительного процесса человека, а на основе вербальной в левом полушарии мозга — не более 10 % мыслительного процесса человека, и только эта часть воспроизводится искусственным интеллектом.

Какова стратегическая цель развития техники в целом исходя из целей развития человеческой цивилизации? Учитывая многогранность интересов и потребностей людей, можно, очевидно, их сформулировать много: это и энергетическое обеспечение, и экология, и жизнеобеспечение и многое другое.

Однако есть одна цель, которая должна быть основной для многих, а может быть и для всех, таких частных целей — это техническое освоение умственных способностей человека, включая, конечно, способность к развитию и самоусовершенствованию.

Первый очевидный путь к этой цели — это изучение мышления человека, его мозга и последующее техническое воспроизведение последнего. Не отвергая, разумеется, этого пути, отметим, однако, что те, кто этим занимается, сами не видят в обозримом будущем возможных сроков такого решения задачи.

Но есть и другой путь — это создание некоего технического аналога "гомосапиенса" на некотором начальном этапе его умственного развития, но с воспроизведением способности всех живых организмов к эволюционному самосовершенствованию. Если создать при этом соответствующие внешние условия для последнего, то можно рассчитывать, что в процессе функционирования такого устройства, да еще с направляющим участием его "создателя" — человека, оно начнет совершенствоваться, и пределом не будут даже способности человека. Но возникает вопрос: а возможно ли создание такого технического аналога живого существа? Ответ очевиден: он уже есть — это робот. Действительно, сама исходная идея робота заключалась именно в создании аналога человека, и современные роботы — это уникальные автоматические машины, которые выпадают из традиционной классификации машин. Они обладают двусторонним информационным и энергетическим взаимодействием с внешней средой и поэтому, действительно, могут обладать способностью к эволюционному совершенствованию.

Для организации такого научного эксперимента необходимо создать исследовательские роботы нового поколения с необходимыми потенциальными возможностями информационно-управляющей системы и памяти, функционально аналогичными уже достаточно для этого изученному головному мозгу человека. Когда-то в ЦНИИ РТК была начата такая работа. Были созданы и соответствующие, так называемые, интегральные роботы. Однако с развалом СССР и всей научно-технической и промышленной структуры страны подобные работы по робототехнике прекратились. Пропало и само отечественное роботостроение.

Но страна возрождается, и настало время возродить и когда-то приоритетные исследования по этой фундаментальной проблеме. Однако хотя создание "разумных" (интеллект плюс креативность) роботов методом самоорганизации решит проблему собственно робототехники, это еще не означает решение проблемы понимания мышления. По существу, мы только получим технический аналог мозга, который будет такой же загадкой, как и сам мозг. И то и другое — "большая система", неподвластная со-

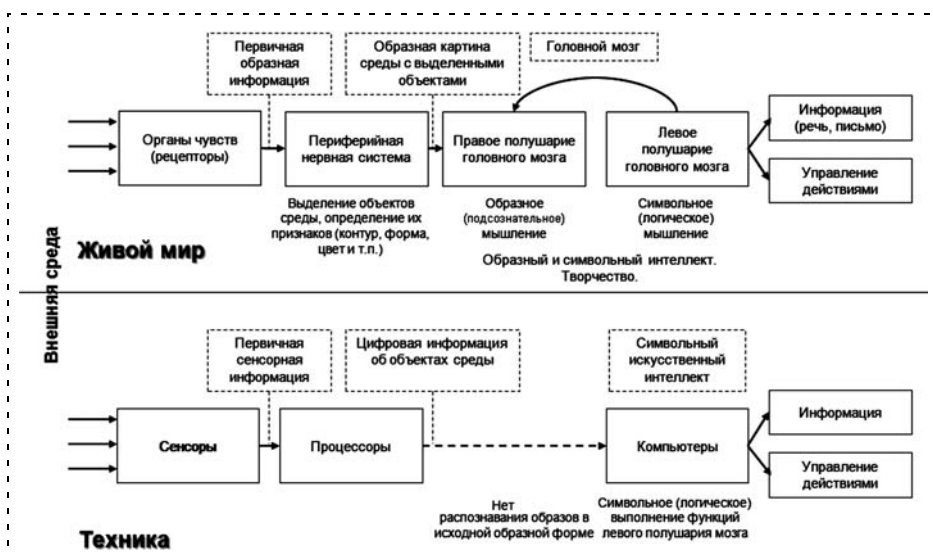


Рис. 1. Сенсорно-информационные структуры в живом мире и в технике

временным методам анализа. Но все же создание таких исследовательских комплексов является важным средством и шагом в познании феномена мышления, так как позволит выполнять над ними любые эксперименты, недопустимые и невозможные для мозга человека, т. е. это будет, помимо достижения основной цели создания "умных машин", еще и уникальным средством познания самого человека.

Прикладная робототехника в своем развитии быстро исчерпала научный задел, который был предоставлен ей, прежде всего, теорией управления и информатикой, а также технический задел в виде приводов и систем ЧПУ, заимствованных у станкостроителей. И сегодня ее дальнейший прогресс целиком зависит от успехов в решении рассмотренной фундаментальной проблемы. Так сомкнулись первоначально почти не связанные два направления развития робототехники — прикладное и фундаментальное.

В начале своего развития робототехника пережила период романтизма, период "бурь и натиска". На смену порожденных кибернетикой споров о том, может ли машина мыслить и может ли превзойти в этом человека, разгорелись дискуссии об опасностях, которые могут принести роботы, вплоть до бунта против людей. Затем наступила зрелость и прозрение: определился целый комплекс серьезнейших научно-технических проблем, которые стоят на пути к царству роботов.

Основная из этих проблем указана выше. Другие — это миниатюризация, интеграция и оптимизация взаимодействия с людьми [2].

Миниатюризация является общей и самой древней тенденцией развития техники в целом. В робототехнике освоение очередного диапазона размерности начинается с отдельных функциональных компонентов — модулей — с последующим созданием целых робототехнических систем новой размерности. В настоящее время освоены системы

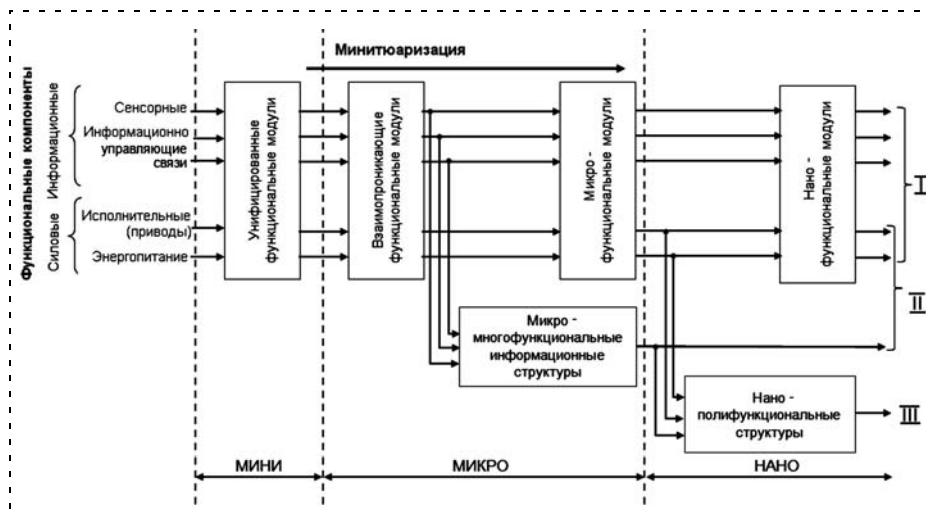


Рис. 2. Этапы миниатюризации компонентов робототехнических систем

миниразмерности и идет освоение микроразмерности. Конечным этапом этого процесса будет создание наноробототехнических систем.

На рис. 2 показаны этапы процесса миниатюризации основных функциональных компонентов робототехнических систем.

Как видно из рис. 2, сформировались три линии этого развития. Линия I продолжает автономную миниатюризацию этих компонентов вплоть до наноразмерности. Линия II показывает постепенное слияние информационных компонентов в единую информационную среду, в которой эти компоненты ведут себя как программные агенты. Линия III находится еще в стадии поисковых исследований в рамках развития нанотехнологий.

Дальнейшим развитием модульных мини-роботов стали роботы переменной структуры — реконфигурируемые роботы. Они получают все более широкое распространение, прежде всего, в экстремальной робототехнике как высшая форма адаптации к неопределенностям и изменчивости внешней среды.

Появление реконфигурируемых мини-роботов и их развитие привело, в свою очередь, к становлению принципиально нового научно-технического направления самоорганизующихся технических систем, которое уже охватывает много видов техники различного назначения.

На рис. 3 показан пример реконфигурируемого робота в нескольких компоновках. Это могут быть соединения в цепочку, в объемные конструкции, в колесные и шагающие мобильные роботы и т. п. Такие роботы предлагаются, в частности, для инспекционных работ с возможностью изменять свою структуру, например, для преодоления препятствий, для проникновения в узкие проходы отдельными модулями с последующей сборкой в исходный робот и т. д.

Показанный на рис. 3 реконфигурируемый робот состоит из многофункциональных модулей в виде двух поворотных половин, внешние стороны

которых снабжены устройствами механического и электрического соединения с другими модулями и ИК дальномерами. Управление модулем осуществляется с помощью микропроцессоров, которые объединяются в локальную сеть робота.

Подобные многофункциональные модули сами являются роботами, поскольку обладают его главным признаком — двусторонним информационным и силовым взаимодействием с внешней средой. Они могут быть интеллектуальными и могут самосовершенствоваться. Объединение, в том числе конструктивное, таких модулей-роботов можно трактовать и как рекон-

фигурируемый робот, и как группу роботов, т. е. в целом как иерархическую реконфигурируемую робототехническую систему.

Ближайшие этапы развития этого направления — создание теории и методики проектирования само- и взаиморемонтирующихся, а затем и самовоспроизводящихся систем. Следующий этап — это самосовершенствующиеся системы и, прежде всего, конечно, эволюционное развитие "технического разума".

Основные технические перспективы этого направления связаны с системами наноразмерности, формирующимися из сотен и тысяч многофункциональных модулей, аналогов клеток живых организмов. Мини-робототехника при этом выполняет роль полигона для физического моделирования и исследования структур и способов группового управления такими большими системами.

В рамках указанного нового направления возникла и новая проблема группового управления большими распределенными в общем случае асинхронными системами, которая кардинально отли-

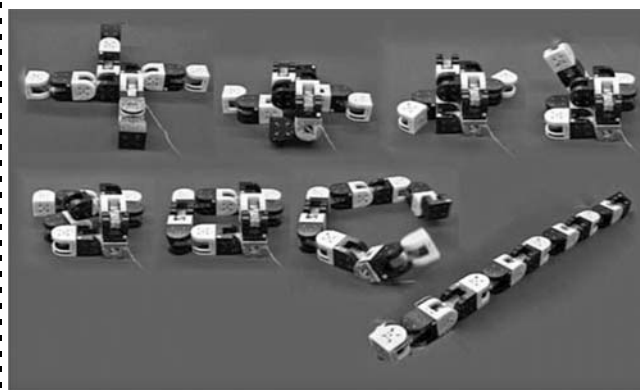


Рис. 3. Самореконфигурируемый робот M-TRAN III (AIST/Tokyo Institute Technology, Япония)



Рис. 4. Перспективы создания многофункциональных нейронных систем

чается от подобной проблематики традиционной робототехники.

Как показано на рис. 2, на рубеже перехода от мини- к микроразмерности в робототехнике наряду с указанным развитием модульных роботов развивается процесс постепенного взаимного проникновения отдельных функциональных модулей и их слияние в целях сокращения массогабаритных параметров. Одним из результатов такой интеграции являются и указанные многофункциональные модули.

Начало этого интеграционного процесса было положено исследованиями перспектив объединения информационных модулей роботов — сенсорных, управляющих, связи на основе технических нейронных сетей. На рис. 4 показана иллюстрация решения этой задачи создания многофункциональных нейронных сетей.

Для силовых модулей — приводных и энергопитания — началом аналогичного процесса должно быть создание принципиально новых поколений этих компонентов на базе нанотехнологий. Работы в этом направлении ведутся во всем мире, однако до конечных технических результатов еще далеко. Правда, эта проблема выпадает из рамок робототехники и является общетехнической проблемой преодоления инерции технических идей еще XIX века, которые в своем развитии давно зашли в насыщение.

Следующая указанная выше проблема взаимоотношений человека и робота также является частью более общей проблемы — проблемы человеко-машинных систем. Эта проблема прошла этапы автоматизации, комплексной автоматизации, роботизации и сегодня наиболее обостренный ее ас-

пект получил формулировку проблемы "человеческого фактора".

Актуальна она и для робототехники. Более того, здесь она усложнена еще тем, что включает два разных аспекта — сочетание робототехнических систем и человека при совместном выполнении различных технологических операций и комбинированное управление этими системами — автоматическое и от человека-оператора.

В первом случае приоритет дается человеку, который обеспечивает максимально разумное поведение, а проблема "человеческого фактора" решается блокировкой неадекватных действий человека автоматикой, что, однако, само по себе проблематично, особенно в чрезвычайных нештатных ситуациях. Во втором случае должно использоваться профессиональное умение человека при управлении операциями, не реализуемыми в автоматическом режиме, и последующее освоение в этом режиме таких операций в порядке обучения.

Очевидно, что основным путем прогресса в решении проблемы "человеческого фактора" также должны быть успехи в решении проблемы создания "искусственного разума".

Таким образом, в целом можно заключить, что современная робототехника является одним из важных направлений развития идей кибернетики, одним из полигонов их отработки и практической реализации.

#### Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ — Петербург, 2010.
2. Интеллектуальные роботы / Под ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007.
3. Юревич Е. И. Робот будущего — робот разумный // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 12. С. 38—41.

**В. А. Лопота**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, президент, генеральный конструктор, ОАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С. П. Королева",

**А. М. Потапов**, д-р техн. наук, проф., Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д. Ф. Устинова,

**А. А. Градовцев**, канд. техн. наук, нач. сектора, Государственное научное учреждение "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики",

**А. И. Каргов**, канд. техн. наук, науч. сотр., Научно-исследовательский центр г. Карлсруэ (Германия),

**И. Ю. Даляев**, инженер, Государственное научное учреждение "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики" [agradov@rtc.ru](mailto:agradov@rtc.ru)

## **Транспортно-манипуляционная система для обслуживания Международной космической станции и поддержки внекорабельной деятельности космонавтов**

*Приведены результаты выполненного в ЦНИИ РТК предпроектного исследования по созданию транспортно-манипуляционной системы (ТМС), предназначенной для оказания космонавтам технической поддержки при осуществлении внекорабельной деятельности на Международной космической станции. Рассматриваются разработанный проектный облик системы, построенные компьютерные модели ее отдельных узлов и системы в целом, обсуждаются состав и принцип функционирования системы, эскизная конструкторская документация на узлы ТМС, макетирование отдельных узлов. Описано проведение космического эксперимента.*

**Ключевые слова:** транспортно-манипуляционная система, космическая робототехника, Международная космическая станция, внекорабельная деятельность, робототехническая система, робот, манипулятор, космический эксперимент

### **Введение**

Опыт эксплуатации Международной космической станции (МКС) показывает, что работы, выполняемые космонавтами на внешних поверхностях космических летательных аппаратов (КЛА), являются наиболее сложными, учитывая их трудоемкость, повышенный риск проведения и стоимость подготовки выхода космонавтов в открытый космос. В ка-

честве примеров можно назвать работы по монтажу оборудования, стыковочные, инспекционные и ремонтные работы. Для решения указанных задач предлагается многофункциональная транспортно-манипуляционная система (ТМС), способная перемещать полезные грузы, необходимый инструмент и оборудование по поверхности КЛА для их доставки космонавту или для дальнейшего выполнения работ — самостоятельно или под управлением человека-оператора.

В ЦНИИ РТК при содействии ОАО "РКК "Энергия" и финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ проводится комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию ТМС, предназначенной для оказания космонавтам технической поддержки при осуществлении внутрикорабельной и внекорабельной деятельности.

### **Анализ мирового уровня**

Современная космическая робототехника представляет собой перспективное научно-техническое направление. Робототехнические системы (РТС) космического назначения сегодня активно разрабатываются и используются в международных космических проектах таких стран, как США, Канада, Япония, страны Европейского союза.

На американском сегменте МКС работают космический манипулятор SSRMS (Canadarm2) и двурукий робот SPDM (Dextre), разработанные корпорацией MDA Space Missions по заказу Канадского космического агентства [1, 2]. Для транспортировки полезных грузов и обслуживания шлюзовой камеры предполагается использование манипулятора ERA, разработанного Европейским космическим агентством [3] и готового к запуску на орбиту. На российском сегменте МКС (РС МКС) завершен космический эксперимент (КЭ) по отработке элементов немецкого манипулятора ROKVISS [4].

Европейское космическое агентство проводит работы по созданию шагающего робота Eurobot для передвижения по наружной поверхности МКС [5].

NASA планирует создать РТС, которые должны обеспечить завершение строительства МКС, принять участие в полетах на другие планеты, вести работы по созданию межпланетных станций и баз на Луне и Марсе. В частности, ведется разработка робота Robonaut гуманоидного типа, снабженного чувствительными манипуляторами, способными воспроизводить движение человеческих рук при выполнении сложных технологических операций [6].

В качестве РТС космического назначения японского производства можно назвать манипуляционную систему для японского модуля МКС (JEMRMS) и беспилотный космический аппарат, обслуживаемый манипулятором (ETS-VII) [7].

На РС МКС из робототехнических средств используется только механический манипулятор "Стрела" [7]. Очевидно, что функциональных воз-

возможностей этого манипулятора сегодня уже не хватает для выполнения текущих задач, стоящих перед космонавтами. Для успешного развития российской космонавтики необходима разработка перспективных отечественных робототехнических устройств.

### Опыт и разработки ЦНИИ РТК

Работы по космической тематике ведутся в ЦНИИ РТК.

Для орбитального корабля "Буран" была разработана система бортовых манипуляторов (СБМ) "Аист" [9], предназначенная для выполнения операций с многотонными объектами: выгрузки доставленного груза, стыковки его с орбитальной станцией, захвата свободно летящего в космосе предмета и его погрузки с последующим возвращением на Землю. Специально для проведения испытаний СБМ "Аист" в ЦНИИ РТК был создан уникальный стенд обезвешивания.

Разработан шагающий адаптивный робот "Циркуль" [10], предназначенный для работы в труднодоступных технологических зонах и выполнения манипуляционных операций: обслуживания и сборки космических станций, осмотра и ремонта трубопроводов и другого оборудования.

В период с 1999 по 2002 гг. в ЦНИИ РТК проводилась работа над проектом DORES (Development of Robotos Elements), в рамках которого был создан действующий макет манипулятора для выполнения технологических операций по обслуживанию полезных грузов и аппаратуры внутри и вне гермоотсеков [11].

Также в ЦНИИ РТК была разработана массожесткостная модель космического манипулятора ERA. В настоящее время в рамках выполнения КЭ "Контур", "Контур-2" совместно с институтом DLR (Германия) проводится отработка системы удаленного управления через публичную сеть Internet космическим манипулятором ROKVISS.

### Технические требования к ТМС

Отправной точкой для проектирования ТМС послужили исходные данные для разработки технического задания на ТМС, подготовленные специалистами ОАО "РКК "Энергия".

Согласно исходным данным ТМС должна выполнять следующие задачи:

1. Инспекция внешней поверхности:
  - инспекция мест загрязнения, оптических поверхностей, агрегатов стыковки, механизмов антенн, мест негерметичности и повреждений;
  - корректировка трехмерной модели МКС;
  - определение координат и осей элементов МКС.
2. Обслуживание служебной и научной аппаратуры:
  - перенос аппаратуры в зону работ и установка на адаптеры;

- соединение электросоединителей, открытие защитных элементов;
- перестановка оборудования и переориентация чувствительных элементов;
- замена расходных материалов.

3. Ремонтно-восстановительные работы на внешней поверхности МКС.

4. Поддержка внекорабельной деятельности (ВКД) космонавтов:

- перенос инструментов в рабочую зону;
- работа в качестве электроинструмента;
- подсветка и телесъемка.

При этом должны быть выполнены следующие условия:

1. Конструктивные требования:
  - габаритные размеры ТМС определяются условиями доставки в транспортно-грузовом корабле "Прогресс" и извлечения через шлюзовую камеру и должны составлять не более  $500 \times 500 \times 1200$  мм;
  - передвижение должно осуществляться по поручням, имеющимся на РС МКС и приспособленным для крепления космонавтов;
  - преодоление разрывов в трассах — не менее 1,3 м;
  - досягаемость рабочих органов ТМС — не менее 2,6 м.

2. Аккумуляторные батареи:
  - максимальная продолжительность рабочего режима — 8 ч;
  - максимальный уровень заряда аккумуляторных батарей:
    - 2400 Вт · ч для функционирования ТМС;
    - 2400 Вт · ч для функционирования переносимого оборудования.

3. Система управления:
  - возможность выполнения всех функций по управлению ТМС с орбитального или с наземного поста управления;
  - ручной и автоматический режимы управления.
4. Беспроводная связь:
  - передача телеметрической и телевизионной информации;
  - полное покрытие внешней поверхности РС МКС.
5. Должен быть предусмотрен комплект сменных инструментов, приспособленных для ТМС.

Для иллюстрации перечисленных требований на рис. 1 (см. третью сторону обложки) изображены фрагменты трехмерной модели РС МКС с примерами расположения поручней, научной аппаратуры и агрегатов на его внешней поверхности, а также фотографии внешней поверхности РС МКС.

### Проектный облик ТМС

Перечислим выработанные базовые принципы функционирования ТМС, определяемые заданными условиями функционирования:

1. Передвижение шагами с креплением за такелажные элементы (поручни) РС МКС с помощью специализированных захватных устройств (ЗУ).

2. Наличие манипуляционной системы, снабженной ЗУ, приспособленным для выполнения технологических операций, в том числе сменными инструментами.

3. Автономная работа с питанием от бортовых источников.

4. Реализация телевизионного и командного беспроводного каналов для связи с наземным и орбитальным сегментами управления.

5. Автоматизация типовых операций, таких как захват поручней при установке ЗУ, и возможность движения по наружной поверхности РС МКС в автоматическом режиме.

6. На наружной поверхности РС МКС должно быть обустроено базовое место робота в целях хранения ТМС в режиме экономии энергии, подзарядки аккумуляторов ТМС, размещения контейнера со сменными инструментами.

Проектный облик ТМС, разработанный в соответствии с перечисленными принципами ее функционирования, представлен на рис. 2.

ТМС представляет собой совокупность двух подсистем: транспортной и манипуляционной, каждая из которых выполняет собственные функции. Для манипуляционной системы была выбрана классическая 6-степенная кинематическая схема, которая является кинематически достаточной и позволяет выполнять произвольный перенос и произвольную ориентацию в трехмерном пространстве закрепленного на конце манипулятора ЗУ.

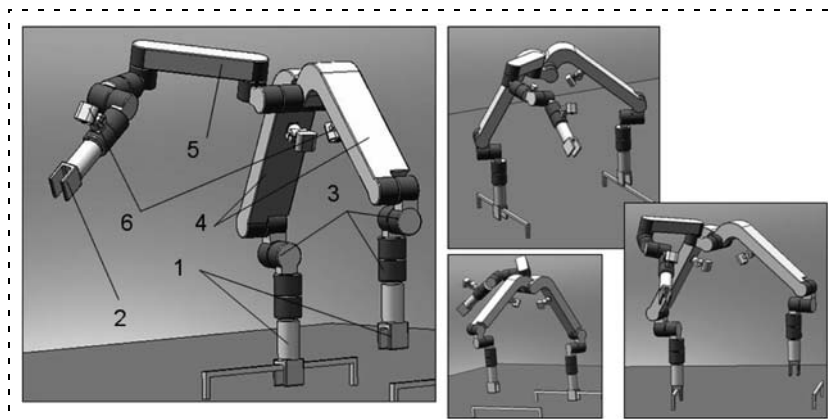


Рис. 2. Проектный облик ТМС:

1 — захваты удерживающие, предназначенные для крепления на такелажных элементах МКС; 2 — захват многофункциональный для выполнения технологических операций; 3 — шарниры; 4 — аппаратный блок; 5 — манипуляционная система; 6 — комплекс телевизионных средств

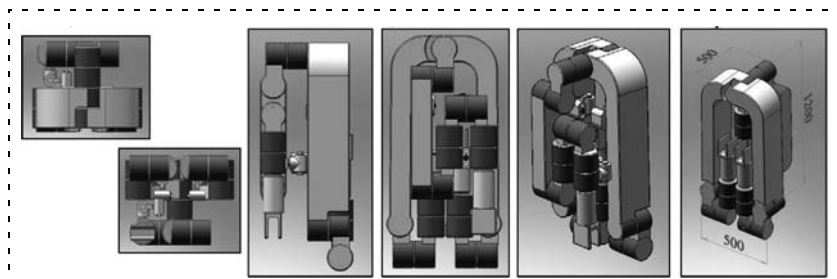


Рис. 3. ТМС в сложенном состоянии

Для транспортной системы была выбрана 7-степенная симметричная кинематическая схема, по сути, представляющая собой манипулятор, способный при закреплении на обоих его концах ЗУ заменить двуногую шагающую конструкцию. Поскольку для двуногого шагающего робота понадобились бы как минимум 12 степеней свободы (по 6 для каждой ноги), то таким способом обеспечивается экономия по габаритным размерам и энергопотреблению. При этом предлагаемая кинематика позволит передвигаться по поверхности РС МКС, преодолевая препятствия (внешнее оборудование, научную аппаратуру) и сопряжения поверхностей (места соединений отдельных модулей, закругления корпуса).

Как показано на рис. 3, в сложенном состоянии конструкция имеет габаритные размеры  $500 \times 500 \times 1200$  мм, что соответствует предъявляемым требованиям.

### Компьютерное моделирование и расчеты

#### ◆ Кинематическое моделирование

Задачами кинематического моделирования являлись:

- обоснование выбранной кинематической схемы (размеры звеньев, число и расположение степеней подвижности);
- прогноз скоростей движения и крутящих моментов в шарнирах;

- прогноз мощностей двигателей;
- оценка динамических усилий на поручнях РС МКС, вызванных силами инерции при движении ТМС;
- отработка сценариев движения и управляющих алгоритмов.

На рис. 4 проиллюстрирован процесс моделирования на примере операции по преодолению сопряжений поверхностей с углом  $90^\circ$ .

Такие модели были построены для всех основных режимов движения:

- движения по криволинейной поверхности;
- преодоления сопряжений поверхностей с углами  $90^\circ$  и  $270^\circ$ ;
- самостоятельного выведения на внешнюю поверхность через шлюзовую камеру;
- манипулирования объектами на примере операции по установке на базовое место робота путем стыковки двух частей устройства фиксации, одна из которых расположена на внешней поверхности модуля РС МКС, а другая закреплена в ЗУ манипуляционной системы ТМС.



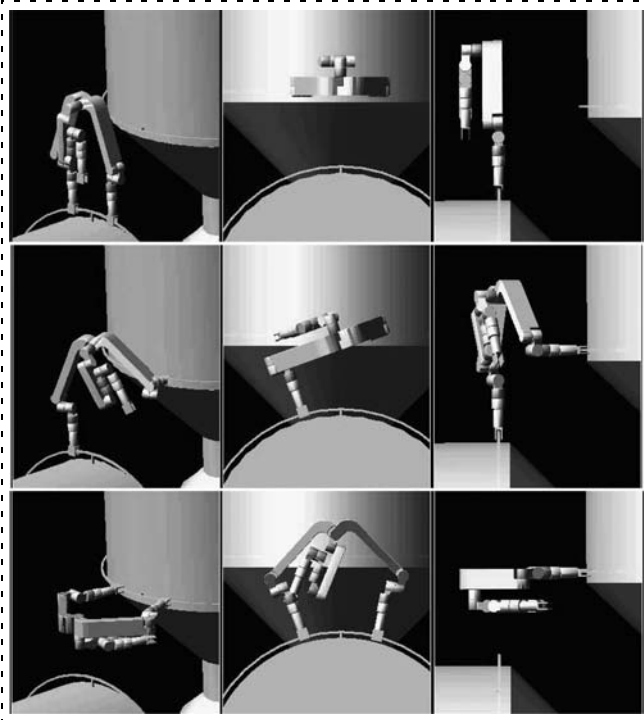


Рис. 4. Преодоление сопряжений поверхностей с углом 90°

Моделирование показало способность ТМС выполнять все требуемые задачи:

- 1) передвигаться по поручням РС МКС с преодолением имеющихся на РС МКС препятствий, включая разрывы в трассах поручней до 1,5 м;
- 2) осуществлять инспекцию внешней поверхности с использованием телекамеры, расположенной на манипуляционной системе ТМС, причем досягаемость (дистанция до инспектируемых объектов) составляет не менее 3 м;
- 3) обслуживать аппаратуру и выполнять ремонтно-восстановительные работы с приложением усилий до 50 Н·м (например, 50 Н на плече 1 м) относительно точки крепления ЗУ на поручнях РС МКС;
- 4) поддерживать ВКД космонавтов.

Результаты моделирования, касающиеся прогнозов по скоростям движения и крутящим моментам в шарнирах ТМС, а также динамических усилий на поручнях РС МКС, возникающих в результате движения по ним ТМС, будут освещены далее.

В процессе моделирования были отработаны сценарии движения, которые на данном этапе являются прообразом управляющих алгоритмов ТМС.

♦ **Динамические усилия на опорных такелажных элементах**

Для оценки динамических усилий на поручнях РС МКС, вызванных силами инерции при движении ТМС, было проведено моделирование шага с различными скоростями. Процесс ускорения и торможения ног при хождении представлял собой параболу, выбранную таким образом, чтобы средняя скорость движения ноги была равна 100 мм/с и 300 мм/с. Результаты моделирования показали зависимость моментов и сил инерционной природы,

действующих на поручни, от скорости движения. Окончательные данные приведены в табл. 1, 2.

Результатом моделирования стал вывод о том, что динамические усилия, вызванные силами инерции при движении ТМС и приложенные к поручням РС МКС, малы по сравнению с их допустимыми значениями. Кроме того, действительные значения усилий могут регулироваться в широких пределах путем изменения скорости движения ТМС, что позволяет при необходимости выработать соответствующие рекомендации.

♦ **Статические усилия при выполнении технологических операций**

Были промоделированы силовые операции, выполняемые ТМС, и возникающие при этом воздействия на типовые поручни РС МКС. Задачами моделирования являлись: оценка углов упругой деформации алюминиевых поручней РС МКС и, соответственно, углов отклонения от исходного положения закрепленной на них ТМС при выполнении силовых операций, а также проверка достаточности прочности поручней РС МКС для таких операций.

Предполагается, что ТМС может быть расположена на одном поручне, на разных одинаково ориентированных поручнях и на разных различно ориентированных (например, перпендикулярных) поручнях, что будет влиять на угол отклонения ТМС (рис. 5). Этот угол не может быть прямо измерен датчиками обратных связей, а значит, возникает необходимость алгоритмической компенсации для обеспечения высокой точности позиционирования при выполнении силовых операций (таких как стыковка ответных частей устройств фиксации). Алгоритмическую компенсацию планируется выполнять на основе показаний датчиков крутящего момента в шарнирах манипуляционной системы, по которым можно рассчитать усилия, приложенные к рабочему органу (ЗУ) извне. Этот расчет даст информацию о знаке и величине компенсирующего управляющего воздействия, необходимого для отработки манипуляционной системой возникающего отклонения от требуемой позиции. Подробнее о датчике момента шарнира будет рассказано ниже.

Таблица 1

**Динамические усилия на поручнях при движении**

Средняя скорость движения ноги, мм/с	Максимальный момент, Н·м	Максимальная сила, Н	Допустимое усилие на поручне, Н
300	70	95	2000
100	7,8	13	2000

Таблица 2

**Динамические усилия при преодолении сопряжений поверхностей**

Средняя скорость движения ноги, мм/с	Максимальный момент, Н·м	Максимальная сила, Н	Допустимое усилие на поручне, Н
300	17	13	2000
100	6	3,5	2000

Углы скручивания поручней

Температура, °С	-50	+50
Угол скручивания при креплении на одном поручне (максимальный, °)	0,743	0,756
Угол изгиба при креплении на двух перпендикулярных поручнях (максимальный, °)	0,250	0,250

Условия моделирования:

- температура: -50° и +50°;
- ширина ЗУ: 50 мм и 150 мм;
- материал поручней: алюминий;
- форма поручней: прямые и изогнутые (радиус скругления 1,5 м) (рис. 6);
- приложенный момент: 50 Н·м;
- крепление ТМС: на одном поручне и на двух перпендикулярных поручнях.

В табл. 3 приведены результаты моделирования, соответствующие наибольшим углам скручивания поручней, т. е. наихудшим условиям работы.




Из приведенных данных видно, что углы скручивания поручней увеличиваются при расположении на одном поручне двух ЗУ с приложением однонаправленного скручивающего момента. Таким образом, при выполнении силовых операций более выгодным является вариант расположения ТМС на двух взаимно перпендикулярных поручнях. Изменение температуры в пределах от -50 °С до +50 °С существенного влияния не оказывает. В самом худшем случае угол скручивания не превышает 0,8°, однако при расположении ТМС на двух взаимно перпендикулярных поручнях эту величину можно удержать в пределах 0,3°. Такие значения являются вполне приемлемыми с точки зрения введения алгоритмической компенсации в контур управления.

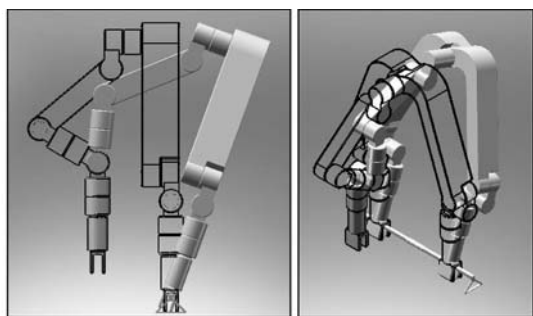
♦ Подсистема автономного энергоснабжения ТМС

Был проведен предварительный расчет для выбора возможных решений по аккумуляторным батареям ТМС в целях прогноза ее характеристик. Сводные данные по современным компонентам приведены в табл. 4.

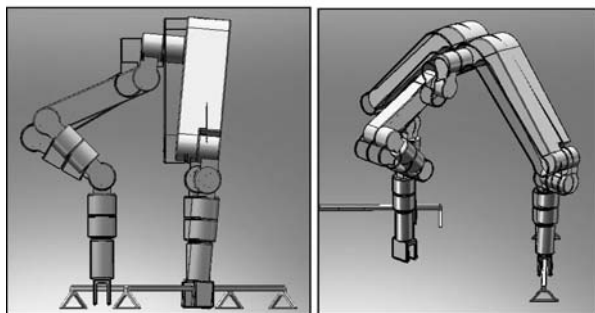
Таблица 4

Обзор рынка аккумуляторных батарей

Производитель	Saft	Thunder Sky	Ригель
Внешний вид			
Номинальная емкость, А·ч (Вт·ч)	80 (2200)	80 (2200)	100 (2700)
Напряжение, В	24...32	20...34	20...29
Масса, кг	29	24	27
Габаритные размеры, мм	430 × 320 × 340	300 × 230 × 220	270 × 240 × 200
Рабочая температура, °С	-30...+50	-30...+75	-30...+50



а)



б)

Рис. 5. Крепление ТМС на одном поручне (а) и на двух перпендикулярных поручнях (б)

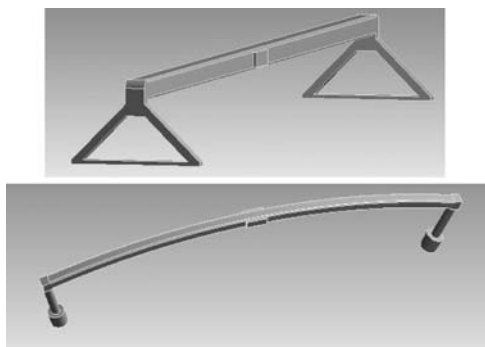


Рис. 6. Прямой и изогнутый поручни длиной 1 м

Как следует из приведенных данных, современные производители предлагают аккумуляторы с приблизительно сходными характеристиками по габаритным размерам, массе и энергоемкости. Следствием явилось решение о том, что на ТМС могут быть размещены два блока аккумуляторных батарей с габаритными размерами до  $300 \times 250 \times 200$  мм и энергоемкостью около  $2400 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ , которые будут обеспечивать автономную работу ТМС продолжительностью до 8 ч. Подзарядка аккумуляторных батарей будет осуществляться при установке ТМС на базовое место робота от бортовой сети РС МКС, напряжение которой составляет 23...29 В.

#### ◆ Приводы ТМС

На основании анализа требований, предъявляемых к ТМС, и с учетом собственного опыта проектирования РТС выполнен предварительный расчет и сделан прогноз по силовой подсистеме ТМС. Исходными данными для расчета являлись:

- данные об усилиях, которые должен развивать рабочий орган ТМС;
- кинематическая схема и размеры звеньев ТМС, определенные при выработке проектного облика;
- данные о выходном напряжении и токе автономных источников питания.

В качестве типового усилия, которое должна развивать манипуляционная система, было принято значение  $50 \text{ Н}$  — усилие, необходимое для состыковки типового устройства фиксации, используемого на РС МКС.

Результатом расчета стал вывод о том, что для ТМС целесообразно применять шарниры двух типов: с повышенным выходным моментом (корневые шарниры ног и манипуляционной системы) и облегченные (все остальные). Прогнозные данные по шарнирам ТМС приведены в табл. 5.

#### ◆ Температурное моделирование

Температурные условия функционирования РТС в космосе характеризуются тем, что помимо нагрева от работающих двигателей также нагревается солнцем поверхность робота, а охлаждение происходит только за счет радиационной теплоотдачи с поверхности. В целях определения возможности работы ТМС в таких условиях было проведено моделирование и расчет тепловых режимов для типового разрабатываемого шарнира робота.

Условия моделирования:

- интенсивность солнечного излучения на орбите постоянна и составляет приблизительно  $1400 \text{ Вт/м}^2$ ;
- для коэффициентов поглощения и излучения тепловых потоков поверхности шарнира приняты соответственно, значения 0,1 и 0,2;
- мощность двигателя составляет  $80 \text{ Вт}$ , а суммарный КПД привода равен 60 % (это означает, что на нагрев идет до 40 % номинальной мощности двигателя, т. е.  $32 \text{ Вт}$ ).

Расчет показал, что шарнир не способен постоянно работать в номинальном режиме из-за чрезмерного нагрева (табл. 6). Также шарнир не может

постоянно оставаться выключенным на неосвещенной стороне из-за чрезмерного охлаждения. Таким образом, планирование движения ТМС следует осуществлять с учетом нагрева ее шарниров, удерживая их температуру в допустимых пределах. В рабочем диапазоне температур нагрев за счет солнечного излучения вносит меньший вклад в результирующую температуру, чем собственное тепловое выделение шарнира. Снижения температуры шарнира можно достигнуть за счет увеличения площади его поверхности для повышения излучающей способности, а также путем уменьшения отношения коэффициентов поглощения солнечного света и радиационного излучения.

Следующим результатом моделирования стали диаграммы моментов, развиваемых шарнирами при передвижении ТМС шаганием. Самыми нагруженными в этом случае оказываются центральный шарнир и два шарнира в "коленных" сочленениях (см. рис. 2). Максимальный развиваемый момент составляет около  $17 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (рис. 7).

Далее были построены диаграммы температуры шарнира, соответствующие его нагреву в периоды движения и остыванию в периоды остановки при шагании ТМС на солнечной стороне (рис. 8).

За час работы шарнир нагревается от  $0$  до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Дальнейшая остановка шарнира на 30 мин приво-

Таблица 5

Приводы ТМС

Тип шарнира	Тип 1	Тип 2
Число, шт.	4	9
Максимальный выходной момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$	100	50
Выходная скорость, $\text{мин}^{-1}$	3	3
Напряжение питания, В	27	27
Мощность двигателя, Вт	80	20
Мощность подогрева, Вт	7	7

Таблица 6

Температура шарнира в установившемся режиме

Условия	Температура наиболее нагретого элемента шарнира, $^\circ\text{C}$
Работающий шарнир на теневой стороне	235...238
Работающий шарнир на солнечной стороне	258...261
Неподвижный шарнир на солнечной стороне	8

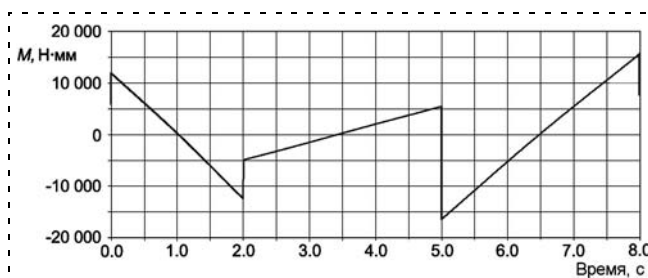


Рис. 7. Крутящий момент центрального шарнира

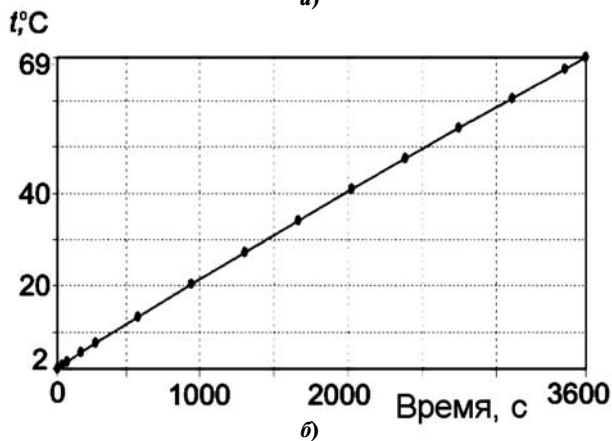
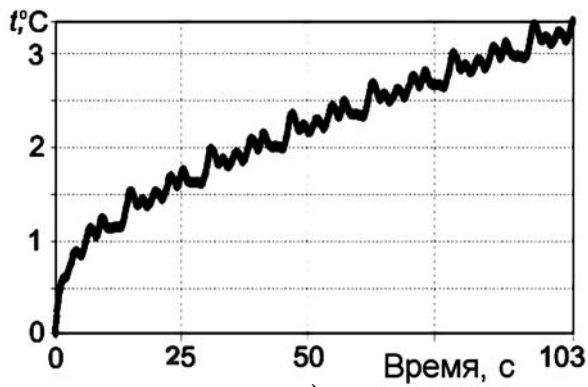


Рис. 8. Температура шарнира в течение 100 с (а) и 1 ч (б)

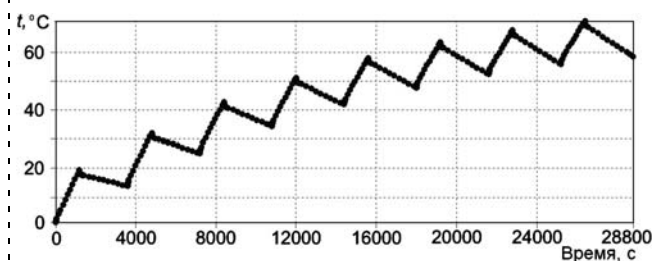


Рис. 9. Температура шарнира на периоде 8 ч в режиме: 20 мин работы, 40 мин простоя; коэффициенты поглощения и излучения: 0,1 и 0,2

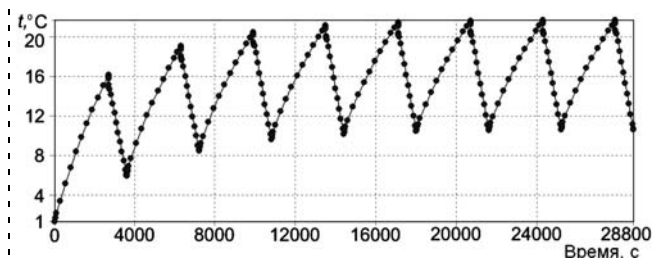


Рис. 10. Температура шарнира на периоде 8 ч в режиме: 45 мин работы, 15 мин простоя; коэффициенты поглощения и излучения: 0,2 и 0,9

дит к его охлаждению всего на 2,3 °С. За счет увеличения площади поверхности шарнира (прорезка желобков на гладкой цилиндрической поверхности) удалось добиться охлаждения шарнира на 8,2 °С.

Следующим шагом стало температурное моделирование для шарнира с пониженным отношением коэффициентов поглощения и излучения. За счет обработки поверхности и нанесения покрытий можно добиться значений коэффициентов поглощения и излучения, соответственно, 0,2 и 0,9. Сравнительные диаграммы температуры шарнира при шагании ТМС на солнечной стороне с остановками для охлаждения приведены на рис. 9 и 10.

В первом случае температура шарнира растет до 70 °С и выше даже в облегченном режиме работы, а во втором случае — держится в пределах 22 °С и в более нагруженном режиме. Таким образом, в данном примере удалось подобрать приемлемый режим работы шарниров.

Сформулируем выводы по результатам температурного моделирования:

- задача обеспечения приемлемых температурных режимов работы шарниров ТМС на внешней поверхности МКС является решаемой;
- нагрев шарниров на теневой стороне достигается за счет работы приводов и проработки механических контактов между узлами шарнира;
- отвод избыточного тепла осуществляется путем увеличения площади поверхности шарнира, достижения требуемого отношения коэффициентов поглощения и излучения поверхности, а также планирования режимов работы ТМС, как было продемонстрировано выше.

#### ♦ Прогноз технических характеристик ТМС

На основании представленных материалов и исходя из собственного опыта построения РТС и проведенных расчетов был сделан прогноз по характеристикам ТМС и сравнение с предъявленными требованиями. Эти данные приведены в табл. 7.

Таблица 7

Прогнозные характеристики ТМС

Параметр	Прогноз	Требование
Число шарниров, шт.	13	—
Напряжение питания, В	27	23...29
Максимальная потребляемая мощность, Вт	600	800
Потребляемая мощность в режиме хранения, Вт	100	100
Емкость автономного источника питания, Вт·ч (А·ч)	2400 (90) + 2400 (90)	2400 + 2400
Длительность автономной работы, ч	8	8
Габаритные размеры в сложенном состоянии, мм	500 × 500 × 1200	500 × 500 × 1200
Преодоление разрывов в трассах, м	Не менее 1,5	Не менее 1,3
Досыаемость рабочих органов, м	Не менее 3	Не менее 2,6

## Структурные схемы ТМС

На рис. 11 и 12 приведены структурные схемы проектируемой ТМС, на которых представлены состав системы (данная схема является прообразом схемы деления ТМС) и принцип ее функционирования.

### Разработка компонентов ТМС

В данном разделе описаны проработанные в ходе предпроектного исследования вопросы, касающиеся отдельных компонентов ТМС.

#### ♦ Шарниры

В качестве базового для проектируемой ТМС был разработан шарнир, изображенный на рис. 13.

Особенностями разработанного шарнира, необходимыми для его применения в ТМС, являются:

- унифицированная конструкция (возможность масштабирования с использованием типового набора встроенных компонентов);
- применение бесконтактного моментного электродвигателя;
- датчики обратных связей по скорости и положению вала двигателя и положению выходного вала шарнира;
- встроенная система управления на базе контроллера;
- устройства электрической и механической стыковки, обеспечивающие возможность модульного построения РТС.

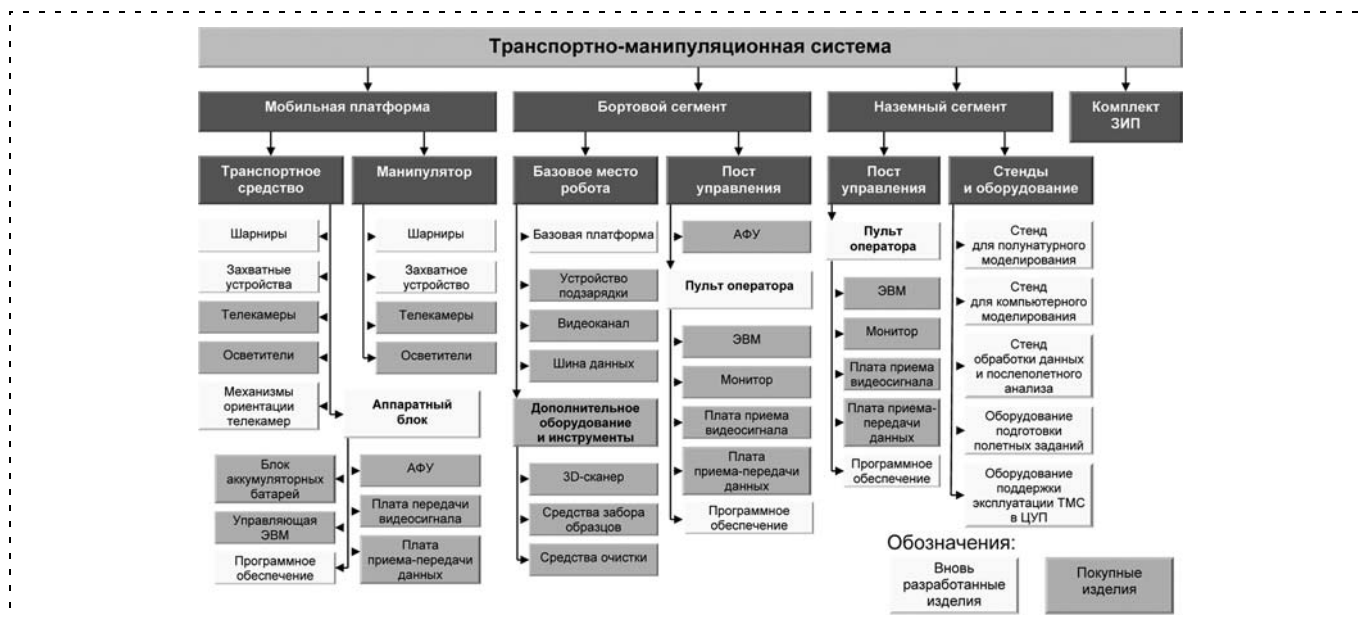


Рис. 11. Состав ТМС

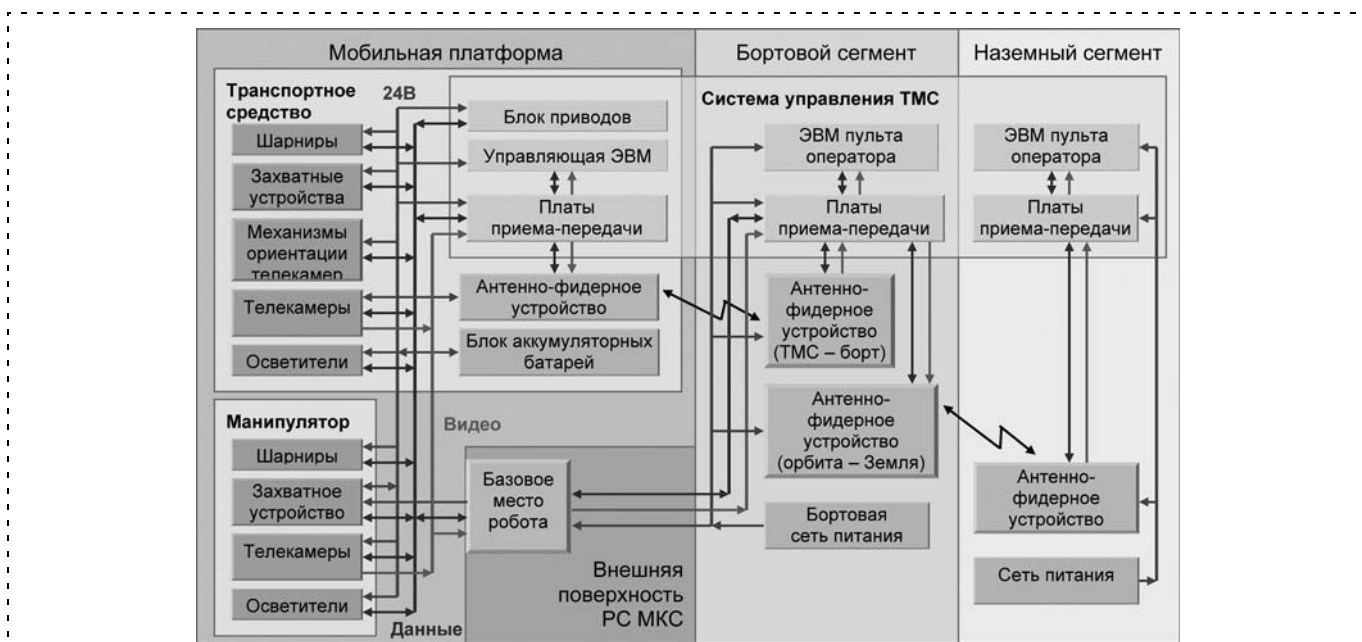
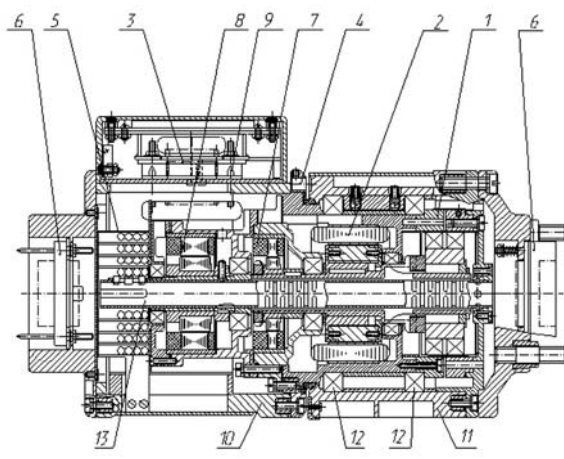
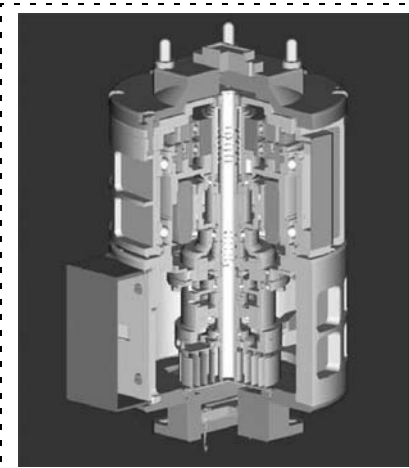


Рис. 12. Функциональная схема ТМС



**Рис. 13. Базовый шарнир ТМС:**  
 1 — волновая передача; 2 — электродвигатель; 3 — контроллер встроенной системы управления; 4 — датчик начального положения; 5 — кабелеукладка; 6 — электросоединитель; 7 — датчик положения и скорости вращения ротора двигателя; 8 — датчик положения выходного вала; 9 — электросоединитель контроллера; 10 — неподвижный корпус; 11 — подвижный корпус; 12 — подшипники; 13 — кабельный канал

♦ **Датчик выходного момента шарнира**

Все шарниры ТМС должны быть оснащены датчиками выходного крутящего момента. Измерение выходного момента потребуется для:

- регулирования усилий, прикладываемых к объектам манипулирования (в частности, при работе ТМС в качестве электроинструмента);
- детектирования столкновения звеньев ТМС с препятствиями в целях предупреждения аварий;
- введения в контур управления алгоритмической компенсации для достижения высокой точности позиционирования ЗУ манипуляционной системы при выполнении силовых операций.

В рамках проведенного исследования построена модель, разработана эскизная конструкторская документация и изготовлен макетный образец датчика момента (рис. 14, см. третью сторону обложки). В настоящий момент проводятся экспериментальные испытания макета датчика.

Датчик представляет собой фланец дискообразной формы, состоящий из внешнего и внутреннего обода, к которым крепятся нагрузка и вал двигателя, соответственно, и четырех спиц, играющих роль упругого элемента. При приложении момента нагрузки спицы датчика упруго деформируются, изгибая закрепленный на них чувствительный элемент, который вследствие этого изменяет свое сопротивление. Регистрируя изменение сопротивления тензорезистора, вычисляют момент, приложенный к датчику.

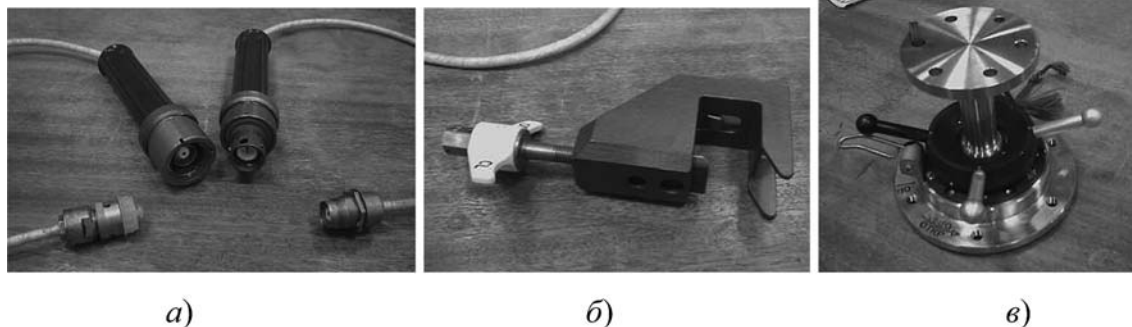
Моделирование позволило обосновать выбор материала упругого фланца (алюминиевый сплав Д16Т) и выбор чувствительного элемента (тензорезистора) с учетом пределов изменения его выходного сигнала и влияния колебаний температуры, вычислить максимально допустимые моменты нагрузки в зависимости от ширины спиц, рассчитать максимальный угол упругого люфта, который вносит датчик (0,07° на 50 Н·м нагрузки).

♦ **Антропоморфное захватное устройство манипуляционной системы ТМС**

Задача разработки ЗУ является одной из наиболее сложных, а сами ЗУ — одними из наиболее технологичных механизмов РТС.

При разработке ТМС был сделан акцент на построении ЗУ, которое позволит выполнять технологические операции по захвату типовых разъемов, устройств фиксации, соединителей, используемых на МКС и предназначенных для ручных манипуляций (рис. 15).

В результате была построена модель и разработана эскизная конструкторская документация антропоморфного ЗУ (рис. 16). Предлагаемое ЗУ — четырехпальце с 12 активными независимыми степенями свободы. Все четыре пальца имеют одинаковую модульную конструкцию и расположены симметрично относительно оси вращения корпуса, содержащего при необходимости дополнительно одну степень свободы. Каждый палец имеет две степени свободы в основном суставе и одну степень свободы в ко-



**Рис. 15. Электросоединители (а), замок, закрепляемый на поручне (б), и магнитно-механический замок (в)**

нечном суставе. Оси вращения в основном суставе смещены относительно друг друга на  $90^\circ$  так, что палец имеет  $90^\circ$  для вращения в плоскости основания манипулятора и до  $120^\circ$  вращения относительно оси манипулятора. Конечные суставы могут быть повернуты на  $90^\circ$ .

Обоснован выбор следующих компонентов антропоморфного ЗУ: двигателей и редукторов, механических передач в суставах, подшипников, материала звеньев, датчиков угла отклонения суставов, чувствительного элемента для тактильного очувствления пальцев. Выбор компонентной базы осуществлен с учетом требований по функциональности ЗУ и с учетом необходимости работы в условиях космического пространства.

Предложенная кинематическая схема и расположение степеней свободы обеспечивают реализацию целевых типов захватов согласно требованиям по функциональности ТМС. Кроме того, в зависимости от комбинации независимых степеней свободы в пальцах возможно исполнение других статических позиций пальцев манипулятора в границах указанных максимальных углов отклонения в суставах.

#### ♦ **Захватные устройства ТМС для крепления на поручнях РС МКС**

Одним из вопросов, требующих проведения отдельного исследования, является вопрос разработки ЗУ для крепления на поручнях РС МКС. На данный момент выработаны следующие требования к ЗУ:

1. Возможность захвата поручней с квадратным сечением размерами  $25 \times 25$  мм и удержания при следующих усилиях (ось  $Ox$  направлена вдоль хода губок, ось  $Oz$  — вдоль продольной оси ЗУ):

- сдвигающие и отрывающие усилия:  $F_x = 90$  Н,  $F_y = 60$  Н,  $F_z = 60$  Н;
- моменты:  $M_x = 60$  Н·м,  $M_y = 60$  Н·м,  $M_z = 60$  Н·м.

2. Конструкция захватных губок должна предусматривать охват поручня с четырех сторон для исключения проскальзывания и отрыва.

3. Возможность захвата поручней других сечений (круглого, квадратного со скругленными углами) со снижением требований по удерживаемым усилиям.

4. ЗУ должно быть снабжено устройством предзахвата, исключающим возможность отрыва от поручня при аварийном отпуске ЗУ. Требования по удержанию усилий к устройству предзахвата: отрыв — 200 кг.

5. Сенсорная система должна обеспечивать получение следующей информации:

- ориентация граней поручня относительно ЗУ;
- усилие сжатия губок;
- степень раскрытия губок;
- информация о касании базой ЗУ верхней грани поручня для уточнения их взаимного расположения;

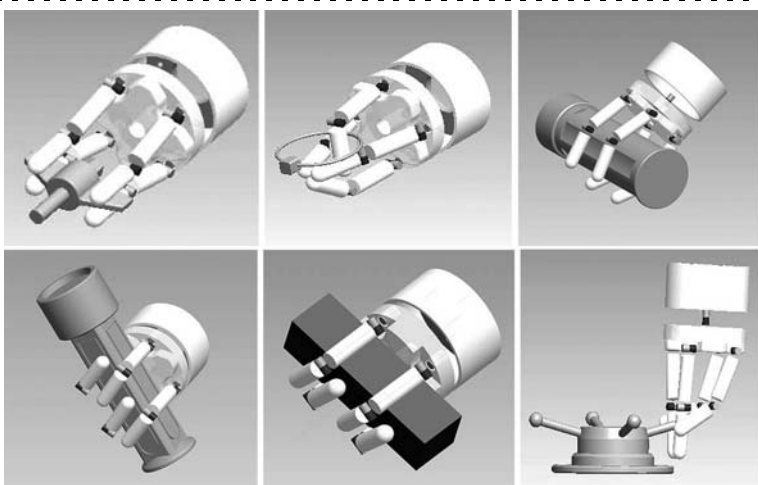


Рис. 16. Моделирование захвата объектов различных типов: ключ, кольцо, разъем шестигранный, разъем четырехгранный, поручень, ручка штурвала

- бесконтактное измерение расстояния до поверхности;
- телевизионная информация: обзор губок и захватываемых объектов (ЗУ также должно быть оснащено осветителем).

Предпроектное исследование по вопросу создания ЗУ для крепления на поручнях РС МКС является следующим этапом проводимых в ЦНИИ РТК работ.

#### Космический эксперимент

В целях экспериментального подтверждения конструктивных решений по отдельным компонентам проектируемой ТМС и в поддержку выполненного предпроектного исследования в ЦНИИ РТК при участии ОАО "РКК "Энергия" начинается ОКР по проведению КЭ "Разработка мехатронных модулей для робототехнических систем космического назначения и отработка их функционирования на наружной поверхности РС МКС".

Цель эксперимента: создание унифицированных мехатронных модулей для РТС космического назначения и отработка их функционирования в составе специализированной манипуляционной системы (СМС) на наружной поверхности РС МКС.

Задачи, решаемые в процессе проведения КЭ:

- исследование комплексного влияния условий открытого космического пространства на конечные характеристики СМС;
- отработка функционирования шарниров с датчиками силомоментного очувствления;
- отработка захвата такелажных элементов РС МКС с помощью адаптивного ЗУ;
- отработка выполнения типовых операций по захвату объектов.

Объектами исследования являются унифицированные мехатронные модули для РТС космического назначения (шарниры и адаптивное ЗУ), а также СМС, созданная на базе унифицированных мехатронных модулей.

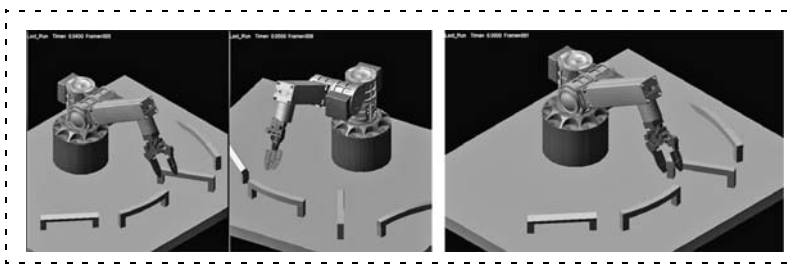


Рис. 17. Схематичный внешний вид СМС

Предмет исследования:

- качество захвата такелажных элементов РС МКС с помощью адаптивного ЗУ в условиях открытого космического пространства, а также материалы и компоненты, необходимые для обеспечения надежного крепления;
- качество работы приводов в условиях открытого космического пространства, способы их энергообеспечения и терморегуляции на наружной поверхности РС МКС;
- отработка интерфейса "человек—машина" для управления манипулятором;
- качество и возможности системы дистанционного управления СМС.

Схематично СМС изображена на рис. 17.

Состав СМС:

1. Манипулятор, устанавливаемый перед началом проведения КЭ на рабочее место на наружной поверхности РС МКС и предназначенный для отработки мехатронных модулей. Включает в себя:

1.1) адаптивное ЗУ, предназначенное для отработки захвата имитаторов поручней и создания усилия сжатия, необходимого для удержания на них, в целях отработки захвата такелажных элементов РС МКС;

1.2) ориентирующий механизм, в состав которого входят звенья и мехатронные модули-шарниры. Механизм предназначен для переноса и ориентации адаптивного ЗУ, а также для отработки приводов в условиях открытого космического пространства;

1.3) телекамеру, расположенную на ориентирующем механизме и предназначенную для визуального контроля за выполняемыми операциями, а также для последующего анализа на Земле точности движения манипулятора по заданной траектории и точности его позиционирования;

1.4) осветитель, предназначенный для подсветки зоны видимости телекамеры;

1.5) блок управления СМС (БУ СМС), включающий аппаратную и программную части системы управления манипулятора, а также интерфейсные устройства, обеспечивающие связь с РС МКС;

1.6) платформу с имитаторами поручней РС МКС. Набор имитаторов поручней должен обеспечивать возможность отработки захвата всех такелажных элементов РС МКС. Такелажные

элементы РС МКС предполагается использовать при создании РТС, передвигающихся по наружной поверхности РС МКС. Имитаторы выполняются с условием максимального соответствия поручням РС МКС в вопросах отработки их захвата с помощью адаптивного ЗУ.

2. Аппаратный блок, размещаемый в герметичном отсеке РС МКС. Аппаратный блок обеспечивает обмен информацией между БУ СМС и пультом управления оператора (портативный компьютер, расположенный в герметичном отсеке).

3. Программное обеспечение пульта управления оператора.

4. Упаковка.

5. Комплект кабелей.

На текущий момент КЭ включен в Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на РС МКС. Выполнение ОКР запланировано в срок с 2011 по 2013 гг.

### Заключение

Робототехнические системы космического назначения сегодня становятся мощным инструментом в решении задач изучения космического пространства, создания и эксплуатации космических летательных аппаратов, исследования планет Солнечной системы.

В ЦНИИ РТК выполнено предпроектное исследование по созданию транспортно-манипуляционной системы, предназначенной для оказания космонавтам технической поддержки при осуществлении внутрикорабельной и внекорабельной деятельности на Международной космической станции. Работы по космической тематике будут продолжены в направлении разработки мехатронных узлов и модулей, необходимых для построения проектируемой транспортно-манипуляционной системы.

### Список литературы

1. **Canadarm2** and the Mobile Servicing System, URL: <http://www.nasa.gov/missionjages/station/structure/elements/mss.html>
2. **Dexter**, URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Декстр>
3. **Digital Library for Physics and Astronomy**, URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ESASP.438..111B>
4. **Kayser-Threde GmbH**, URL: [http://www.kayser-threde.de/de/press/news\\_detail.php?id=134](http://www.kayser-threde.de/de/press/news_detail.php?id=134)
5. **Eurobot** makes a splash, URL: [http://www.esa.int/esaCP/SEMA6RNSP3F\\_index\\_0.html](http://www.esa.int/esaCP/SEMA6RNSP3F_index_0.html)
6. **Robonaut** homepage, URL: <http://robonaut.jsc.nasa.gov>
7. **Springer Handbook of Robotics** / edited by Bruno Siciliano, Oussama Khatib, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
8. **Europäische Weltraumorganisation ESA**, URL: <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet88/steve88.htm>
9. **Система бортовых манипуляторов "Аист"**, URL: <http://www.rtc.ru/robotics/kis.shtml>
10. **Шагающий адаптивный робот "Циркуль"**, URL: <http://www.rtc.ru/robotics/cirkul.shtml>
11. **DORES (Development of Robotoc Elements)**, URL: <http://www.rtc.ru/robotics/dores.shtml>



**Е. М. Немцев**, аспирант,  
БГТУ "Военмех" им Д. Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург  
enemtsev@yandex.ru

## Применение платформы QNX для цифрового адаптивного нейросетевого управления приводами робота PUMA-560

*Рассматривается реализация универсального цифрового адаптивного нейросетевого алгоритма управления приводами манипуляционного робота PUMA-560 на основе операционной системы реального времени QNX Neutrino. Расчет управления выполняется на персональном компьютере. Нейронная сеть обучается в процессе работы системы в реальном времени.*

**Ключевые слова:** QNX Neutrino, нейронные сети, управление манипуляционным роботом, управление в реальном масштабе времени

### Введение

Одной из центральных задач современной мехатроники и робототехники является программное управление сложными многосвязными системами в реальном масштабе времени. К таким системам относятся манипуляционные, шагающие, транспортные роботы, пилотируемые объекты, объекты нефтехимии и др. Они, как правило, многорежимны, а их динамика описывается системами нелинейных уравнений высокого порядка с переменными параметрами и структурой. Применение традиционных методов синтеза законов управления объектами такого рода затруднительно и обычно не приводит к удовлетворительным результатам. Поэтому актуальными являются разработка и исследование новых подходов к управлению подобными сложными системами.

Бурное развитие вычислительной техники в последнее время привело к широкому распространению Unix-подобных операционных систем реального времени (ОСРВ) для персонального компьютера (ПК) и появлению в области аппаратного обеспечения ПК малой стоимости с высокой производительностью. В результате платформа на базе ПК получила широкую функциональность, а использование узкоспециализированных программных и аппаратных средств стало в большинстве случаев излишним. Перед разработчиками открылись новые возможности, позволяющие создавать системы управления с большей гибкостью и универсальностью.

В настоящее время ОСРВ успешно применяются для управления робототехническими и мехатронными системами: в работе [1] описывается использование ОСРВ QNX для управления автономными подводными роботами, в [2–4] представлены под-

ходы к построению систем управления манипуляционными роботами, в работе [5] рассмотрена реализация программного обеспечения шагающего антропоморфного робота на основе ОСРВ.

С учетом вышесказанного разрабатывался программно-аппаратный комплекс на базе ПК с ОСРВ для управления приводами манипуляционного робота PUMA-560. На его основе планировалась реализация цифрового нейросетевого адаптивного регулятора [6]. При этом необходимо было создать как можно более универсальный инструмент, позволяющий исследовать и другие современные цифровые алгоритмы управления многосвязными объектами.

### Объект управления

PUMA-560 представляет собой шестизвальный антропоморфный робот-манипулятор. Он имеет шесть степеней свободы: вращаются "пояс", "плечо" и "локоть", в трех измерениях передвигается "кисть", которую можно оснащать различными захватами и инструментами. В приводах звеньев используются двигатели постоянного тока.

Одним из основных элементов аппаратной части комплекса для управления роботом является силовой блок, разработанный на кафедре "Мехатроника и робототехника" БГТУ "Военмех" [7]. Он состоит из шести унифицированных цифровых модулей, построенных на базе высокопроизводительного 16-разрядного сигнального процессора Freescale 56F8323, работающего на частоте 60 МГц. Каждый модуль обладает возможностью обрабатывать сигналы датчиков, управлять силовыми ключами, а также осуществлять обмен данными по сети CAN. Для организации связи управляющего ПК с силовым блоком используется плата сопряжения Элкус CAN-200PCI.

### Платформа QNX

В результате проведенного анализа современных ОСРВ в качестве базовой для управляющего ПК выбрана система QNX Neutrino. Это объясняется выполнением следующих требований к системе:

- *поддержка жесткого реального времени.* Обеспечение постоянного времени выполнения задачи реального времени даже при сильной загрузке является критически важным при управлении. Быстрое переключение контекста, малые задержки обработки прерываний, а также использование вытесняющей приоритетной многозадачности позволяют получить быстрое и прогнозируемое время отклика системы на основе QNX Neutrino;
- *высокие требования к быстродействию.* Одним из основных требований к реализуемой системе является минимальное использование вычислительных ресурсов и их резервирование для алгоритма управления. Обладая быстродействующей

щим микроядром, QNX полностью удовлетворяет этому требованию;

- *удобство разработки и отладки.* Важным элементом платформы QNX является среда разработки Momentics. Она обладает обширными возможностями отладки приложений: отслеживание распределения памяти, состояния потоков, счетчиков, блокировок и очередей сообщений, отладка подключаемых библиотек. Кроме того, в Momentics встроен сборщик загрузочных образов, позволяющий выбрать только необходимые для работы целевой системы библиотеки и файлы. В QNX Neutrino реализован самодостаточный графический интерфейс пользователя — Photon MicroGUI. Он предоставляет все основные примитивы графической оконной системы: окна, кнопки, меню и т. д.

Выполнение перечисленных требований позволило обеспечить работу созданного программного комплекса в реальном масштабе времени: в зависимости от сложности исполняемого алгоритма возможно управление с частотой до 10 кГц.

На рис. 1 представлена общая схема реализованного программно-аппаратного комплекса. Целевая система работает на ПК на базе процессора Intel Pentium 4 3.00 GHz с 512 Мбайт ОЗУ. Разработка и отладка осуществляется удаленно по сети.

Поддержка QNX Neutrino стека TCP/IP позволяет организовать получение переходных характеристик системы управления в MATLAB в реальном масштабе времени. Для этого в Simulink используется Instrument Control Toolbox. Стандартное программное обеспечение QNX предоставляет возможность организовать управление роботом по локальной сети с помощью удаленного доступа. Для этого имеются клиенты для различных операционных систем.

## Структура управляющего программного обеспечения

На сегодняшний день существует множество готовых платформ для управления роботами, в том числе работающих под управлением QNX [2], однако специфичность задачи и оборудования предопределила разработку программного обеспечения с нуля. В результате проведенной работы создан программный комплекс, включающий в себя графический пользовательский интерфейс, алгоритм расчета управления приводами и математическую библиотеку функций. Все эти компоненты объединены на одной платформе (ПК), написаны на одном языке программирования (C++) и работают в под управлением одной ОСРВ (QNX Neutrino). Предлагаемый подход обладает следующими преимуществами:

- *простота* — системы с централизованной архитектурой легче запускать, они проще в отладке, понимании и расширении;
- *гибкость на всех уровнях* — каждый компонент системы открыт для расширения и модификации. Во многих готовых решениях открытая архитектура доступна только на определенных уровнях, тогда как модификации других уровней (например, контура управления) закрыты, так как они были реализованы на базе закрытых программных продуктов.

В предлагаемом решении все процессы выполняются на одном ПК, а многозадачность обеспечивается за счет использования средств операционной системы. Программа управления создает дополнительные потоки, когда необходимо одновременное выполнение нескольких задач. На рис. 2 представлена схема распределения задач системы управления по потокам.

Во время запуска программы управления работает только один основной поток. Он отвечает за начальную инициализацию системы, а также включает в себя обработку графического интерфейса. После инициализации библиотек и платы CAN запускается поток обмена данными с модулями управления. В нем обрабатываются прерывания, вызываемые интерфейсной платой CAN при отправке и получении сообщений. Затем, когда пользователь запускает управление манипулятором, создается поток контура управления. Он включает в себя таймер, в котором происходит передача управляющих пакетов для модулей силового блока в поток обмена данными, ожидание ответов на запрос, а также расчет управления. Для увеличения скорости работы используются оба имеющихся на плате сопряжения канала: в программе модулей управ-

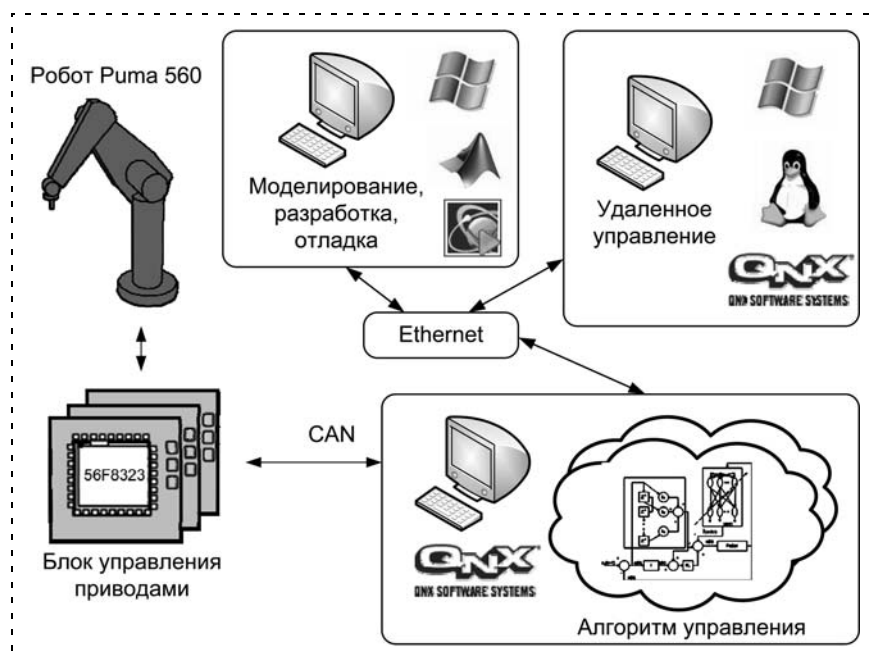


Рис. 1. Общая схема управляющего комплекса

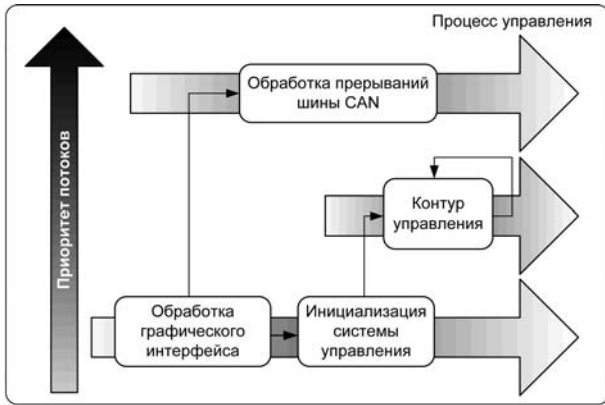


Рис. 2. Структура потоков программы управления

ления введена специальная адресация и фильтрация на основе стандарта CAN. Использование одной физической линии CAN ограничивает скорость обмена, поэтому было принято решение о разделении модулей на две группы в соответствии с их функциональностью. К первой группе относятся модули управления тремя нижними приводами, отвечающими за ориентацию робота, ко второй — модули управления тремя верхними приводами, осуществляющими ориентацию схвата. Работа комплекса в реальном масштабе времени обеспечивается за счет задания потокам разных приоритетов. Для обмена данными между различными задачами используется передача сообщений и стандартные для QNX средства синхронизации, такие как прерывания и условные блокировки.

Для управления сложными многосвязными объектами в расчетах необходимо использование аппарата матричной алгебры. Кроме того, работа в реальном масштабе времени задает высокие требования к скорости вычислений. Поэтому создание универсального инструмента для реализации алгоритмов управления потребовало использования готовой математической библиотеки функций, обеспечивающей наибольшее быстродействие.

Для сравнения было рассмотрено три библиотеки: Armadillo, NEWMAT и IT++. В результате исследования их быстродействия в различных условиях при различных входных данных выбор был сделан в пользу библиотеки Armadillo [8]. Она предоставляет выигрыш в производительности в некоторых задачах от 10 до 1000 раз, либо обеспечивает сравнимое время выполнения опера-

ций. Эта библиотека использует подход отложенного преобразования для объединения нескольких операций в одну в целях сокращения числа временных переменных или избавления от необходимости их иметь, что, в свою очередь, влияет на скорость выполнения расчетов. Там, где возможно, порядок операндов оптимизируется. Отложенное выполнение и оптимизация достигаются благодаря рекурсивным шаблонам и шаблонному метапрограммированию. Также важным является то, что в данной библиотеке внимание уделено как "большим", так и "маленьким" матрицам. Кроме быстрого действия данная библиотека обеспечивает использование языковых конструкций, которые значительно упрощают интерфейс разработки.

### Адаптивный цифровой нейросетевой алгоритм управления

Одной из задач при создании управляющего комплекса была реализация цифрового адаптивного нейросетевого алгоритма управления [6]. Его ключевыми особенностями являются возможность настройки весов нейронной сети во время работы системы, а также достаточно низкие требования к вычислительным ресурсам. Сферой практического применения данного алгоритма является прямое компьютерное управление сложными многосвязными объектами в реальном масштабе времени при решении различных задач управления (стабилизации, слежения, наведения и др.).

На рис. 3 представлена структура реализуемого регулятора. В нем нейронная сеть используется для идентификации динамики манипулятора, а пропорционально-дифференциальный регулятор — для компенсации ошибок аппроксимации.

Управление и веса нейронной сети в исследуемом алгоритме рассчитываются на каждом шаге в соответствии с уравнениями [6]

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}_v \mathbf{r}(k) - \hat{\mathbf{W}}^T(k) \hat{\phi}_2(k) - \lambda_1 \mathbf{e}_n(k) - \lambda_2 \mathbf{e}_{n-1}(k) - \dots - \lambda_{n-1} \mathbf{e}_2(k); \quad (1)$$

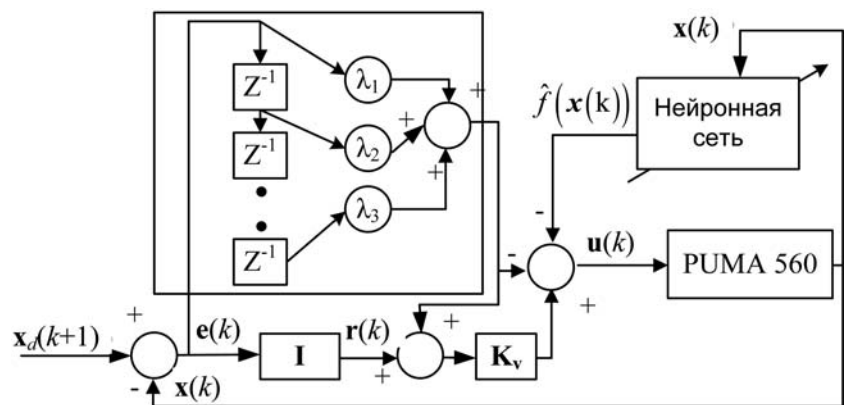


Рис. 3. Структура адаптивного нейросетевого регулятора

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{V}}(k+1) &= \hat{\mathbf{V}}(k) - \alpha_1 \hat{\phi}_1(k) [\hat{\mathbf{y}}_1(k) + \\ &+ \mathbf{B}_1 \mathbf{K}_v \mathbf{r}(k)]^T - \Gamma [\mathbf{I} - \alpha_1 \hat{\phi}_1(k) \hat{\phi}_1^T(k)] \hat{\mathbf{V}}(k); \\ \hat{\mathbf{W}}(k+1) &= \hat{\mathbf{W}}(k) - \alpha_2 \hat{\phi}_2(k) \mathbf{r}(k+1) - \\ &- \Gamma [\mathbf{I} - \alpha_2 \hat{\phi}_2(k) \hat{\phi}_2^T(k)] \hat{\mathbf{W}}(k),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\hat{\phi}_1(k) = \varphi(\mathbf{x}(k))$  — сигмоидальная активационная функция;  $\hat{\phi}_2(k) = \varphi(\hat{\mathbf{V}}^T(k)\varphi(\mathbf{x}(k)))$  — выход скрытого слоя нейронной сети;  $\mathbf{r}(k)$  — фильтрованная ошибка слежения;  $\hat{\mathbf{y}}_1(k) = \hat{\mathbf{V}}^T(k)\hat{\phi}_1(k)$ ;  $\mathbf{e}_n(k) = \mathbf{x}_n(k) - \mathbf{x}_{nd}(k)$  — ошибка слежения;  $\mathbf{K}_v$  — матрица коэффициентов усиления;  $\mathbf{B}_1$  — матрица настроечных параметров;  $\alpha_1, \alpha_2, \Gamma$  — коэффициенты адаптации;  $\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{W}}$  — матрицы весовых коэффициентов нейронной сети;  $\mathbf{u}(k)$  — вектор управления, а  $\mathbf{x}_n(k), \mathbf{x}_{nd}(k)$  — текущее состояние системы и задающее воздействие.

На основе предложенной схемы в ОСРВ QNX Neutrino реализован алгоритм управления (1)–(2). Параметры настройки подобраны эмпирически с помощью предварительного моделирования [9], так как на сегодняшний день не разработан алгоритм их выбора.

Экспериментальные исследования включали в себя изучение реакции на типовые возмущающие воздействия для одного или нескольких звеньев, движение с постоянной скоростью, гармонические возмущения различной амплитуды и частоты. Кроме того, были проведены опыты с динамически изменяющейся нагрузкой и имитацией груза, а также исследование влияния различных конфигураций робота на качество управления. Полученные данные подтвердили результаты моделирования [9] и предположение о перспективности использования современных нейросетевых алгоритмов для управления сложными многосвязными системами в условиях параметрической и функциональной неопределенности, а также возможность их реализации в реальном масштабе времени.

### Заключение

Основным результатом проведенных исследований является разработка и реализация комплекса программных средств для цифрового управления

приводами манипуляционного робота PUMA-560. В ходе работы решены следующие задачи:

- сконфигурированы компоненты аппаратной части системы управления, выбрана структура комплекса, определена ОСРВ для управляющего ПК;
- для существующего аппаратного обеспечения в QNX Neutrino создан пакет приложений, позволяющих осуществлять управление роботом с тактом до 10 кГц, заложена возможность быстрого и легкого изменения и настройки алгоритма управления;
- в среде MATLAB создан программный комплекс, работающий непосредственно с программой управления роботом и позволяющий получать информацию о состоянии системы на каждом шаге работы алгоритма;
- реализован цифровой адаптивный нейросетевой алгоритм управления приводами робота. Экспериментальные исследования подтвердили результаты предварительного моделирования и показали, что исследуемый регулятор способен идентифицировать модель динамики и обеспечить малые ошибки слежения.

Дальнейшая работа предполагает решение задачи оптимального структурного и параметрического синтеза для представленного нейросетевого алгоритма управления.

### Список литературы

1. Ваулин Ю., Инзарцев А. Применение ОС QNX в подводной робототехнике // Современные технологии автоматизации. 2002. № 3. С. 66–71.
2. Costescu N., Dawson D., Loffler M. QMotor 2.0 — A Real-Time PC Based Control Environment // IEEE Control Systems Magazine. June 1999. С. 68–76.
3. Багаев Д. В., Ковалев А. С., Симаков А. Л. Система управления учебным роботизированным комплексом — Robotics // Control Engineering. 2007. № 3. С. 8–10.
4. Maass J. Open Modular Robot Control Architecture for Assembly Using the Task Frame Formalism // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2006. № 1. С. 1–10.
5. J. W. Grizzle Jonathan Hurst, Benjamin Morris, Hae-Won Park, Koushil Sreenath. MABEL, A New Robotic Bipedal Walker and Runner // Proceedings of the 2009 conference on American Control Conference. 2009. С. 2030–2036.
6. Sarangapani J. Neural Network Control of Nonlinear Discrete-Time Systems. New York.: CRC Press, 2006. С. 100–120.
7. Кузнецов В. А. Модернизация систем управления манипуляционными роботами Puma PM-01 и Akronics PT-300V // Сб. тр. 18-й конф. по экстремальной робототехнике. ЦНИИ РТК. 2007.
8. Armadillo: C++ linear algebra library [Электронный ресурс] <http://arma.sourceforge.net/>
9. Nemtsev E., Zhukov Y. Adaptive neural network control of mechatronics objects // Acta Mechanica et Automatica. V. 2. N 4. Bialystok: Bialystok Technical University, 2009. 81 p.

**В. В. Александров**, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.,  
**С. В. Кулешов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
 Учреждение Российской академии наук  
 Санкт-Петербургский институт информатики  
 и автоматизации РАН  
 alexandr@mail.iias.spb.su

## Цифровая программируемая технология управления робототехническими комплексами

*Рассмотрены ключевые аспекты использования концепции программируемой технологии при построении систем управления робототехническими комплексами. Выделены перспективные направления развития: программируемый радиоканал, единая коммуникационная платформа, виртуализация окружающего пространства и ряд других.*

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, цифровая программируемая технология, концепция симуляции, виртуализация обстановки, программируемый радиоканал

Медленно, но неуклонно внедряются новые терминологические понятия, характеризующие развитие техногнозиса XXI-го века. Достаточно проследить за рейтингом употребления слов и понятий новостных сообщений, чтобы понять общую тенденцию развития робототехнических комплексов:

... На Байконур отправлен первый **"цифровой"** пилотируемый корабль "Союз". Это первый корабль новой, **"цифровой"**, серии, отличающийся от кораблей серии "Союз-ТМА" переходом от **аналоговых** систем к **цифровым** [1].

...Автомобиль с **искусственным интеллектом** самостоятельно движется по дорогам, семь подобных автомобилей прошли около полутора тысяч километров без вмешательства человека [2].

...в самолете F-35 реализована система DAS **"блужий глаз"** виртуального пространственного видения и сопровождения ракет на расстоянии 1200 км, которая состоит из **нескольких оптических датчиков**, размещенных в разных точках фюзеляжа. Компьютер соединяет их изображения в одну бесшовную картину окружающей обстановки. DAS обнаруживает и сопровождает цели в полностью пассивном режиме (без подсветки радаром или лазером), и не требует вмешательства пилота... компьютер просчитывает, транслирует и синтезирует картинку для пилота, которую бы он видел, если бы непрозрачного пластика и металла вокруг не было... [3].

В приведенных выше выдержках отмечены ключевые понятия качественно новых инновационных путей развития робототехнических комплексов (РТК). Развитие робототехники, кибернетики, искусственного интеллекта и распознавания образов получило первый импульс в 60-х годах прошлого века в период активного внедрения компьютеров.

Инженерно-техническая реализация любой системы опирается на этап ее функционального моделирования, поиска соответствующей передаточной функции между входом и выходом системы управления.

В данной статье мы используем понятие парадигмы как совокупности концепции, аксиоматики, методов, адекватных возможностям существующей технологии. Развитие технологических возможностей, например современные цифровые программируемые нанотехнологии, приводит к необходимости смены парадигмы.

Так, например, с XIX века по настоящее время можно выделить три этапа в развитии парадигм:

1) **аналогово-функциональная парадигма**, которая опирается на математическое моделирование, основанное на аппроксимации передаточной функции системы управления операторами Лапласа, Хэвисайда. Их инженерная реализация в виде аналоговых электронных звеньев (интегратор, дифференциатор, линия задержки и пр.) получила неадекватное название аналоговой вычислительной машины (аналоговый компьютер). Аналоговая ветвь электронного моделирования до сих пор сохранила терминологию в методах проектирования цифровых фильтров;

2) **вычислительная парадигма**. Появление цифрового компьютера (электронно-вычислительных машин) свело аналоговый электронный процесс передаточных функций к математическому моделированию, эффект которого зависит от разрядности, структуры представления данных, скорости вычисления на основе арифметической аксиоматики, определяемой базисом процессорных команд. Специфическая сложность такого вычислительного процесса и требует введения понятия "вычислительная парадигма". А. Н. Колмогоров предупреждал [4]: "...*Весьма вероятно, что с развитием современной вычислительной техники будет понятно, что в очень многих случаях разумно изучение реальных явлений вести, избегая промежуточный этап их стилизации в духе представлений математики бесконечного и непрерывного, переходя прямо к дискретным моделям. Особенно это относится к изучению сложно организованных систем, способных перерабатывать информацию*". Его понятие информации исходило из алгоритмической теории и понималось как **программа** "записи" информационного содержания **без потерь** семантико-смыслового контента;

3) **парадигма информатики (программируемая технология)**. Только появление технологии производства микропроцессоров вызвало смену парадигмы с вычислительной на программируемую, в основе которой лежат операции индексной идентификации, тождества, упорядочения, а не арифметической аксиоматики.

Современные цифровые технологии [5] ставят и решают проблему исходя из постулата А. Н. Колмогорова:

...способ, позволяющий по виду записи находить ее номер, а также по номеру (идентификатору) восста-

навливать саму запись, является обычно весьма простым (так что существование алгоритма, "перерабатывающего" запись в номер, и алгоритма, "перерабатывающего" номер в запись, не вызывает сомнений)...

...На языке вычислительной математики можно назвать  $p$  "программой", а  $S$  "методом программирования". Тогда можно будет сказать, что  $p$  есть минимальная длина программы, по которой можно получить информационный объект при методе программирования  $S$  [4].

Для парадигмы информатики важно различать два принципиально разных понятия информации и, соответственно, два варианта оценки их сложности:

- ансамблевая (энтропийная) — количественная оценка информации по Шеннону, сложность которой имеет монотонную зависимость от объема данных [6];
- объектная (идентификация) — информация по А. Н. Колмогорову, определяется как минимальная длина программы построения информационного объекта, при этом сложность — длина программы — не зависит от объема данных.

Именно эта "объектная" оценка сложности построения информационного объекта парадигмально, качественно видоизменяет понятие цифровой технологии обработки данных. Но до сих пор в русскоязычной научной и учебной литературе упор в разработках систем управления и связи делается на "общую теорию коммуникации" Котельникова — Шеннона. Хотя с 1967 года известен алгоритм Витерби, но лишь появление микропроцессоров позволило его реализовать как цифровую рекурсивную фильтрацию [7], но не как современную концепцию цифровой программируемой технологии (например, SDR).

Главная особенность перехода от **аналоговых** систем к **цифровым** — в качественно иных интеграционных и функциональных возможностях цифровой программируемой технологии (ЦПТ), принципиально связанных с освоенным уровнем технологического процесса изготовления микросхем: от 10000 нм в системах традиционной аналоговой связи и 500...50 нм в существующих системах цифровой мобильной связи до требуемых 10 нм в перспективных системах SDR [8].

Не концепция информационного общества с инфраструктурой электронного документооборота и интернет-технологиями лежит в основе инноваций и техногнозиса XXI века. Новый уровень нанотехнологий при производстве микросхем качественно изменяет их функциональные возможности для программирования, решая интеграционную задачу инфотелекоммуникаций, реализуя подход, сформулированный в алгоритмической теории Колмогорова.

Рождается новый вид конкурентной борьбы технологий — "борьба за нанометры", которая напоминает известную в свое время "борьбу за потолок в воздухе".

При этом уровень информационной безопасности может зависеть не только от производительности

процессоров, взламывающих криптографический ключ протокола дистанционного управления робототехническим комплексом, но и от возможности реализовать высокоскоростной АЦП, способный обеспечить мониторинг радиоканала для приема сверхширокополосного сигнала.

Реализация универсальной среды инфотелекоммуникационного обмена на основе подхода программируемого радио (Software Defined Radio — SDR) позволяет провести интеграцию всех видов связи, обеспечивая совместимость протоколов и форматов для построения универсальных инфокоммуникационных структур данных (текста, видео, звука), и осуществить конвергенцию различных видов информационного содержания [4].

Реализация SDR-технологии возможна при использовании АЦП и ЦАП с частотой выборки порядка 10 GSPS (миллиардов выборок в секунду) и процессоров с производительностью порядка 100 GSPS (миллиардов битовых операций в секунду). А это, в свою очередь, требует использования электронных компонентов, построенных на основе нанотехнологий, так как на таких частотах способны работать только элементы наноструктур [4]. Принципиальным становится вопрос уровня технологии — то, что возможно реализовать при уровне технологического процесса 20 нм, невозможно на 50 нм и т. д.

Развитие технологий дает возможность по сути непрерывного удаленного контроля и управления в реальном времени новым поколением робототехнических систем.

Исчезает парадигма пространственного ограничения при управлении РТК. Если РТК находится в пределах коммуникационного пространства, то всегда остается принципиальная возможность осуществлять контроль и управление.

При этом надежность организации радиоканала обеспечивается не за счет аналоговых параметров (отношение сигнал/шум, чувствительность и избирательность приемника), а за счет использования дополнительных информационных характеристик при широкополосном мониторинге канала связи.

Следующий аспект касается систем протоколирования действий технических комплексов. Традиционная концепция "черного ящика", предполагающая накопление и хранение эксплуатационных параметров технического объекта в режиме "off-line", полностью изменяется за счет возможности непрерывного интерактивного обмена телеметрией со стационарным центром управления. При этом такой обмен возможен не только в пределах зоны радиобмена, но и в любой точке виртуального коммуникационного пространства, обеспечиваемого операторами сотовых сетей и областью покрытия спутниковой связи.

Другой особенностью является использование концепции управления РТК путем симуляции, т. е. адаптации системы к условиям окружающей обстановки на основе анализа текущей ситуации без использования моделей, по экспертным наборам

правил реакции на сенсорные изменения. Окружающая обстановка формируется как список ограничений, соответствующих целевой функции РТК. Технический объект должен себя "видеть и понимать" себя в окружающей обстановке.

Сенсорное поле формирует параметры контроля, которые должны согласовываться с физически доступными нормами поведения объекта в той среде, в которой он находится (например, автомобиль не может превышать скорость движения в городе и т. п.).

Техническая система должна иметь запас по сенсорным возможностям. Важно подчеркнуть, что резервирование сенсорных возможностей должно быть не физическим, а логико-семантическим (так, для получения данных по высоте летательного аппарата (ЛА) могут использоваться данные с барометрического датчика, приемника GPS и системы инерциальной навигации).

Концепция симуляции включает принцип виртуализации обстановки (virtual environment) вокруг РТК. Реализация принципа виртуализации окружающей обстановки происходит путем интеграции данных положения навигационной системы (GPS, ГЛОНАСС), картографических данных, спутниковых снимков земной поверхности и данных с бортовой камеры ЛА. Разнородная информация представляется в имеющих "физический" смысл геоцентрических координатах; на нее можно уже не только "взирать" со стороны, но и оказываться погруженным в документально точный географический и ситуационный контекст (рис. 1).

С помощью спутниковых или радионавигационных систем определяется приближительное положение ЛА в пространстве, а также происходит локализация области карты (картографический слой). Данные спутниковых снимков хранятся в памяти бортового компьютера, имеют привязку к картографическому слою, но являются устаревшими по отношению к текущему времени. Путем совмещения изображений с бортовой камеры ЛА и спутниковых снимков осуществляется высокоточная локализация положения ЛА в пространстве по отношению к картографическим данным и спутниковым снимкам.

Использование концепции программируемого радиоканала (SDR) в качестве коммуникационной инфраструктуры РТК позволяет применять ее для задач сбора, обработки и передачи сенсорных данных, а также в качестве базовой цифровой платформы для навигационной и локационной аппаратуры.

Внешние сенсорные данные используются для построения виртуальной трехмерной обстановки вокруг ЛА и GPS-навигации в целях повышения безопасности и эффективности управления. Достоинством цифровой платформы ЛА, использующей в качестве коммуникационной инфраструктуры SDR, является возможность гибкой адаптации к радиообмену с различными унаследованными системами без модернизации оборудования (рис. 2),

а также потенциально большое число одновременно поддерживаемых протоколов локационных, навигационных и коммуникационных систем [9].

В целом можно выделить характерную особенность в построении систем с использованием цифровой программируемой технологии.

Все аналоговые системы и большинство существующих цифровых систем строились по жесткой последовательной схеме, где каждый функциональный блок был предназначен для реализации одной функции с заданными (или частично перестраиваемыми параметрами). Выбор вариантов использования возможных функциональных блоков (конфигурирование) осуществлялся путем коммутации однотипных блоков (рис. 3).

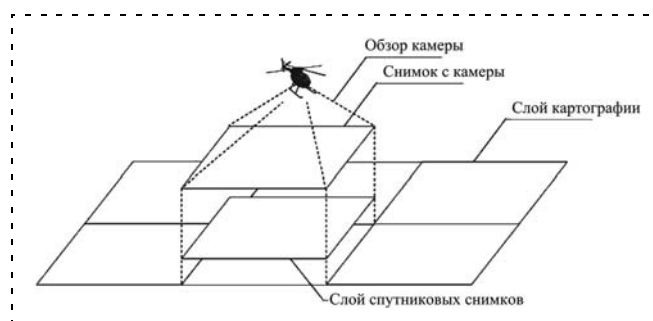


Рис. 1. Восстановление виртуальной среды ЛА

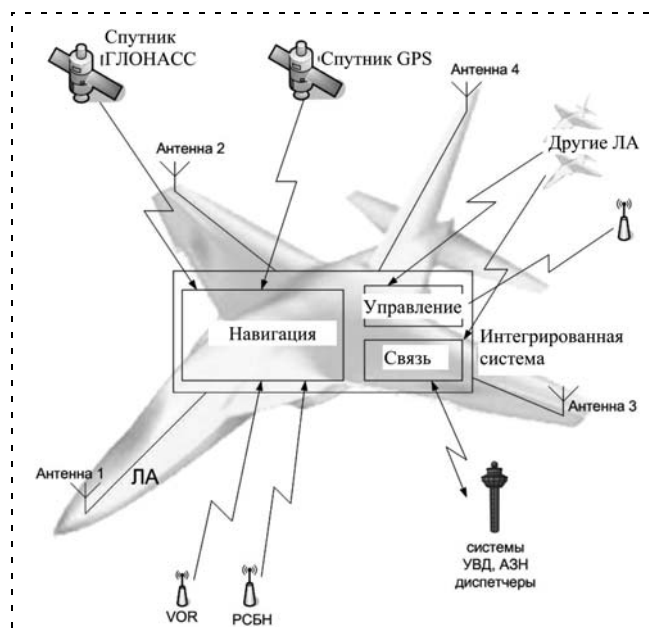


Рис. 2. Единая коммуникационная платформа ЛА

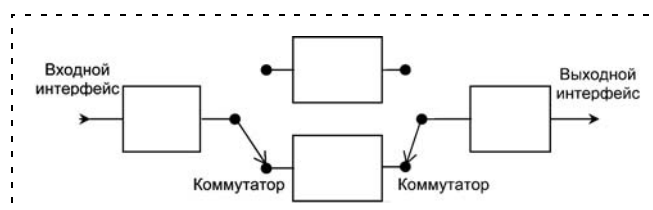


Рис. 3. Жесткая архитектура системы

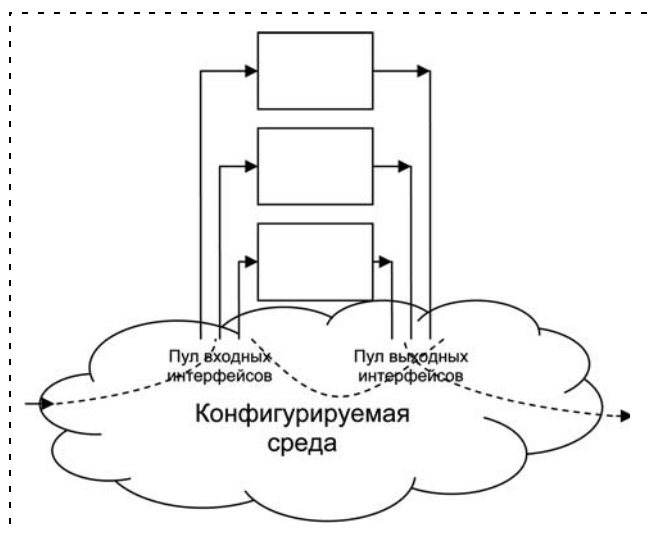


Рис. 4. Реконфигурируемая архитектура системы

Системы, отвечающие требованиям программируемой технологии, всегда предполагают возможность программного реконфигурирования в процессе работы (runtime configuration), а не только в процессе разработки (design time configuration), для адаптации под конкретную задачу. Такие системы предполагают наличие конфигурируемой среды и унифицированных интерфейсов функциональных блоков (рис. 4).

Конкретный тип реализации конфигурируемой среды зависит от возможностей используемой технологии и определяется задачей.

Приведенная в начале статьи цитата Колмогорова показывает, что изменился базис представления знаний: цифровая технология создала новый язык для сложившегося "цифрового" техногнозиса.

Знание оказалось заключенным не в текстах или математических формулах, а в структурах форматов и протоколов, а также в программах — универсальном, не зависящем от национального языка виде.

Отчетливо проявляется тот факт, что русский язык при описании цифровых программируемых технологий используется лишь в качестве связок между англоязычной терминологией и русскоязычным сленгом. Темп смены такого языка требует непрерывного мониторинга для самообразования, построения узкоспециализированных глоссариев и составления нормативных документов.

#### Список литературы

1. На Байконур отправлен первый "цифровой" пилотируемый корабль "Союз". URL: [http://www.tsenki.com/news/news\\_ts/index.php?ELEMENT\\_ID=3853&PAG\\_EN\\_3=12&PAGEN\\_1=17](http://www.tsenki.com/news/news_ts/index.php?ELEMENT_ID=3853&PAG_EN_3=12&PAGEN_1=17)
2. Нечеловеческий фактор // Известия. № 190. 12 октября 2010.
3. Глаза пилота могут видеть на расстоянии 1200 км. URL: [http://md.cnews.ru/army/news/top/index\\_science.shtml?2010/09/09/408060](http://md.cnews.ru/army/news/top/index_science.shtml?2010/09/09/408060)
4. Колмогоров А. Н., Успенский В. А. К определению алгоритма // Успехи математических наук. 1958. Т. 13. Вып. 4. С. 3.
5. Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В. Цифровая технология инфокоммуникации. Передача, хранение и семантический анализ текста, звука, видео. СПб.: Наука, 2008. 244 с.
6. Александров В. В., Кулешов С. В. Этерификация и терминальные программы // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 10. Т. 6. С. 50—53.
7. Александров В. В., Горский Н. Д. Представление изображений. Рекурсивный подход. Л.: Наука, 1985. 190 с.
8. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982. 258 p.
9. Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В., Зайцева А. А. Концепция и теория нанотехнологии физической среды инфотелекоммуникации (прототип SDR) // Тр. СПИИРАН. Вып. 6. СПб.: Наука, 2008.
10. Александров В. В., Кулешов С. В. Компьютерный симулятор речевизуального интерфейса управления и контроля летательным аппаратом // Матер. конф. "Человеческий фактор в авиации и космонавтике". Москва—Ярополец, 13—15 июня 2007 г.

## ИНФОРМАЦИЯ

**S<sup>2011</sup>**  
**Sibcon**

15—16 сентября 2011 года в г. Красноярске состоится

### 9-я МЕЖДУНАРОДНАЯ IEEE-СИБИРСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ И СВЯЗИ 2011

**Председатель конференции** - проф. Г. С. Патрин, Сибирский федеральный университет

#### Тематика конференции:

- Фундаментальные проблемы теории управления и связи
- Радиолокация, радионавигация и распространение радиоволн
- Нанотехнологии, полупроводниковые материалы, сенсоры и электронные приборы
- Нейрокибернетика, биофизика и медицинская электроника
- Радиофизика и оптика

#### Контактная информация:

В. С. Панько, Сибирский федеральный университет,  
оф. Б-408, ул. Киренского, 28, Красноярск, 660074, Россия  
Тел.: (391)-2912278

Эл. почта: [sibcon@sfu-kras.ru](mailto:sibcon@sfu-kras.ru)

Сайт конференции: <http://chapters.comsoc.org/tomsk/sibcon/index.htm>



# ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 62-5

**Б. В. Новоселов**, д-р техн. наук,  
начальник научно-производственного комплекса,  
ОАО "Всероссийский научно-исследовательский  
институт "Сигнал"  
signal@kovrov.ru

## Новые подходы в проектировании регулируемых приводов

*Излагаются дополнительные к классическим рекомендации по проектированию регулируемых приводов (РП) в вопросах системо- и схемотехники. Показано, что проектирование РП должно носить комплексный подход, предусматривающий оптимальное сочетание, взаимодействие и взаимопроникновение всех составных частей комплекса, в который входят РП.*

**Ключевые слова:** регулируемые приводы, этапы проектирования, встраиваемость и взаимопроникаемость составных частей, комплексный подход при проектировании

### Рекомендуемые этапы работ при проектировании регулируемых приводов

До последнего времени курсы по проектированию регулируемых приводов (РП) предусматривали следующие основные этапы работ: энергетический расчет силовой части (двигатель — редуктор — усилитель), расчет корректирующих устройств, обеспечивающих требуемые показатели качества, выбор основных элементов РП, конструирование приборов, расчет надежности РП и оценка определенных экономических показателей (в основном, это расчет себестоимости изделия и сравнение ее с аналогами).

Современные условия требуют уточнения указанных этапов проектирования и введения целого ряда принципиально новых, которые приблизят проектировщика к реалиям текущего времени. Прежде всего, началу проектирования должен предшествовать первый этап, раскрывающий факторы, которые влияют на процесс проектирования, определяющий источники финансирования работы и пути стимулирования творческой инициативы проектанта. На рис. 1—3 в сконцентрированном виде представлены основные составляющие указанных возможностей проектировщика.

Оценивая внешние факторы (рис. 1), следует четко представлять, с каким заказчиком будет работать проектировщик, какими возможностями заказчик обладает, и с какой ритмичностью будут поступать средства, выделенные на проектирование.

Источников финансирования (рис. 2) теоретически достаточно много. Однако практика показывает, что основными реальными источниками являются хозяйственные договоры с заказчиками и внутренние резервы, складывающиеся из прибыли, а также возможностей экспортных заказов и текущих НИОКР. Важным моментом в проектной работе является материальная заинтересованность творческой инициативы проектировщиков (рис. 3). Необходимо обратить внимание на два важных, отмеченных на рис. 3, пути стимулирования творчества: учеба в аспирантуре с работой над диссертацией по теме,

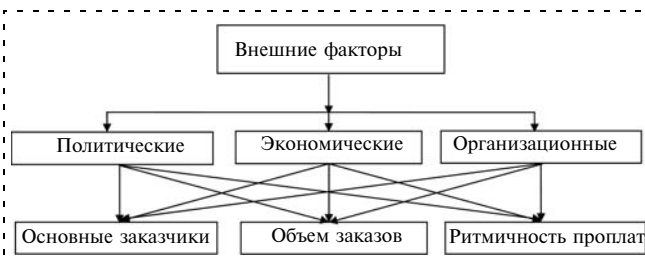


Рис. 1. Внешние факторы, влияющие на проектирование изделий

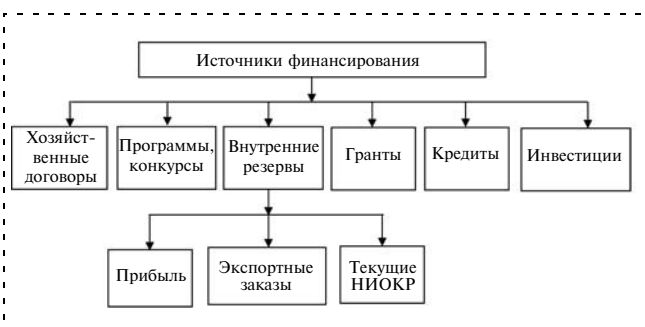


Рис. 2. Возможные источники финансирования разработок

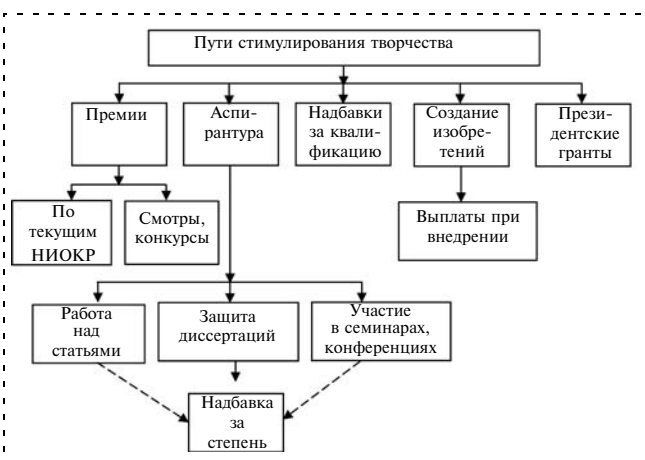


Рис. 3. Пути стимулирования творчества проектировщиков

тесно связанной с проектной разработкой, созданием и внедрением изобретений.

Сам непосредственный процесс создания РП представлен в виде структурной схемы на рис. 4.

Важным вторым этапом в проектировании был и остается энергетический расчет силовой части РП и синтез структуры РП. Сегодня существует целый ряд методов расчета и синтеза с использова-

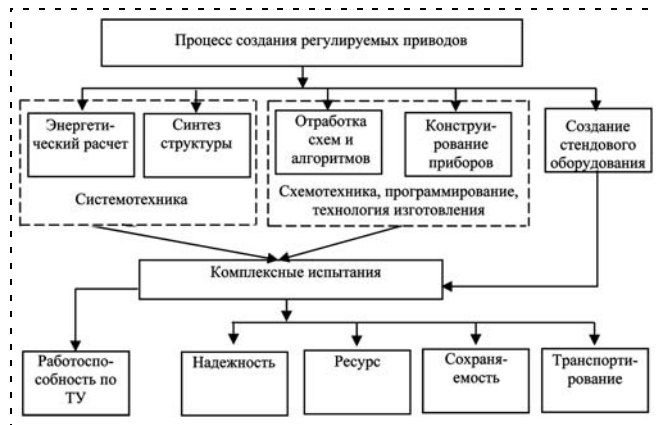


Рис. 4. Структура процесса создания регулируемых приводов

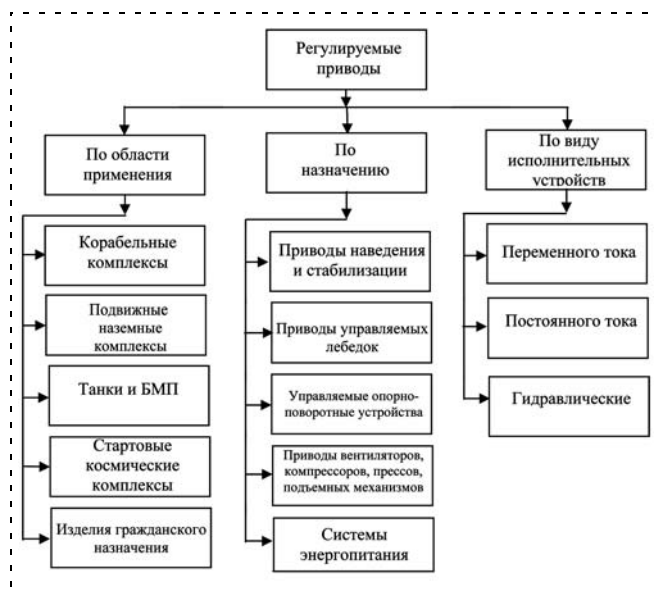


Рис. 5. Классификации регулируемых приводов разработки ФГУП "ВНИИ "Сигнал"

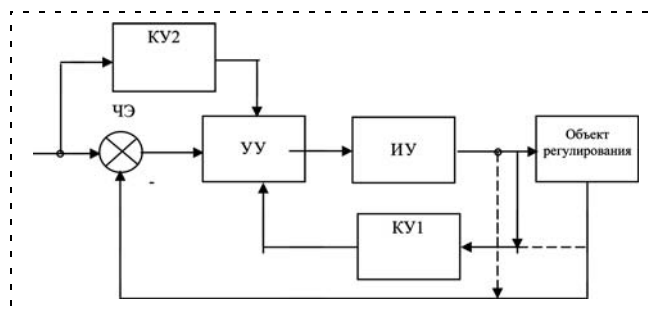


Рис. 6. Упрощенная блок-схема регулируемых приводов

нием компьютеров. Умение их использовать позволяет выполнить второй этап проектирования без особых осложнений. Наиболее сложным является третий этап проектирования (рис. 4), включающий отработку схем и алгоритмов приборов и их конструирование с учетом возможности технологии изготовления в производстве конкретного предприятия. Выполнению этого этапа должны предшествовать четкое определение области применения РП, их назначения и типа исполнительного двигателя, так как именно они определяют требования к РП по механическим и климатическим воздействиям, по показателям надежности, по режимам работы и т. д.

На рис. 5 в качестве примера представлена классификация РП разработки ФГУП "ВНИИ "Сигнал". Схема не требует дополнительных пояснений. Ясно, что, к примеру, конструкции приборов РП для стартовых космических комплексов коренным образом отличаются от конструкций приборов танков и БМП по массогабаритным показателям, климатическим условиям, механическим воздействиям и т. д.

### Основные условия, необходимые при проектировании составных частей регулируемых приводов

При выполнении проектных работ очень важно понимать, что функции составных частей РП в современных условиях резко расширились по сравнению с классическим представлением.

На рис. 6 изображена блок-схема РП, обычно представляемая в учебно-методической и справочной литературе, где ЧЭ — чувствительный элемент, УУ — усилительное устройство, ИУ — исполнительное устройство, КУ — корректирующие устройства.

Не будем давать классическое определение функций каждого элемента, но для примера напомним: ЧЭ — устройство, обеспечивающее сравнение входного и выходного сигналов РП и выработку сигнала, пропорционального этой разности, т. е. ошибки РП.

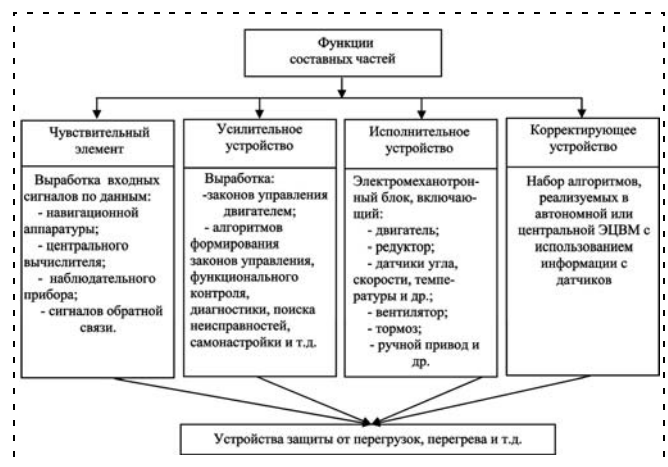


Рис. 7. Функции составных частей регулируемых приводов

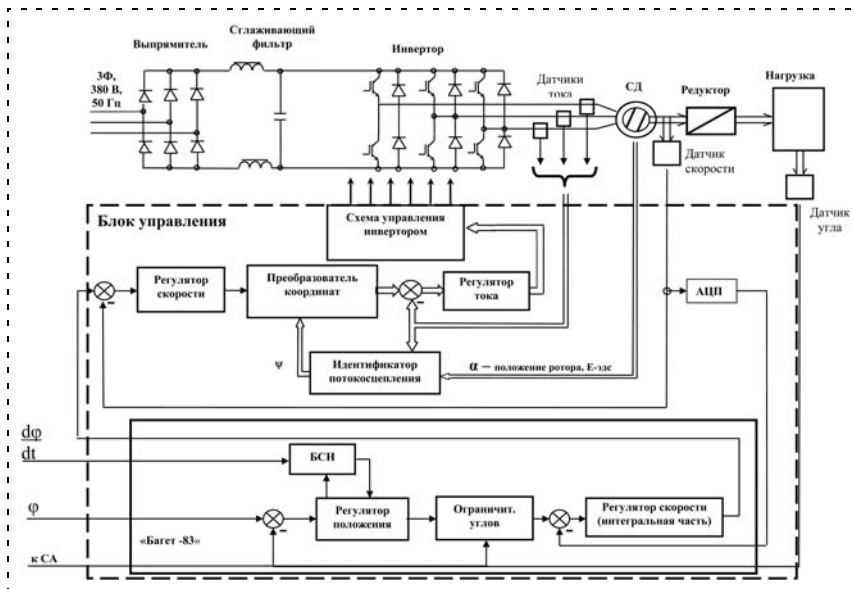


Рис. 8. Функциональная схема электропривода переменного тока

В действительности, функции каждой составной части РП значительно шире по сравнению с классическим представлением. В схеме на рис. 7 сформулированы функции каждой из составных частей современного высокоточного цифрового, динамического, с широким диапазоном регулирования скоростей РП.

С учетом этих функций и должен быть сформирован подход к проектированию каждой из составных частей РП, причем при этом необходимо предусматривать выполнение трех важнейших условий:

1) оптимизация схемотехнических решений, так как схемы управления РП сегодня включают в себя набор технических устройств, таких как контроллеры, драйверы, силовые ключи и т. д.;

2) модульное исполнение блоков, включающее в себя целый ряд взаимодействующих, взаимовлияющих и взаимодополняющих элементов (например — двигатель, редуктор, датчики обратных связей, вентилятор, тормоз и др.);

3) встраиваемость и взаимопроникаемость исполнительного устройства РП, объекта регулирования, систем энергоснабжения (СЭП).

Для пояснения необходимости выполнения первого условия на рис. 8 представлена функциональная схема электропривода, построенного на базе синхронного двигателя с векторным управлением двигателем [1].

Схема включает в себя конвертор, инвертор, четыре регулятора координат, преобразователь координат, блок самонастройки (БСН), идентификатор потокоцепления, схему управления инвертором и другие составные части. Даже при использовании автономного для РП микропроцессора создание оптимальной по структуре схемы является весьма сложной схемотехнической задачей.

Подтверждением целесообразности перехода к построению модульных блоков является создание

синхронного двигателя, включающего в себя электромеханический тормоз, датчики угла, скорости и тока.

Подобная конструкция практически исключает люфты, кинематические погрешности, упругие деформации между составными элементами, уменьшает суммарные массы и габаритные размеры элементов.

В подтверждение необходимости выполнения третьего условия на рис. 9, 10 представлены характеристики объекта регулирования типа артиллерийской установки, которые, естественно, должны учитываться при синтезе структуры РП, т. к. моменты нагрузки определяют энергетику РП, а погрешности во многом определяют показатели качества РП [2, 3].

Но это лишь одна сторона вопроса. От компоновки приборов РП на объекте регулирования зависят механические и климатические воздействия на приборы, условия их эксплуатации.

Наличие ограничителей углов перемещения, устройств стопорения, торможения, защиты во многом определяют схемные решения РП. Рассмотренные на схеме (рис. 9) характеристики ОР, влияющие на показатели, схемные и конструкторские решения РП, особенно ярко проявляются при создании управляемых опорно-поворотных устройств (УПОУ) для антенн, оптических и телевизионных приборов [4, 5]. Здесь помимо

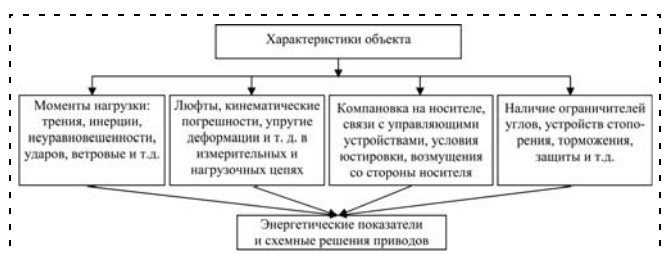


Рис. 9. Характеристики объекта регулирования, влияющие на работу приводов

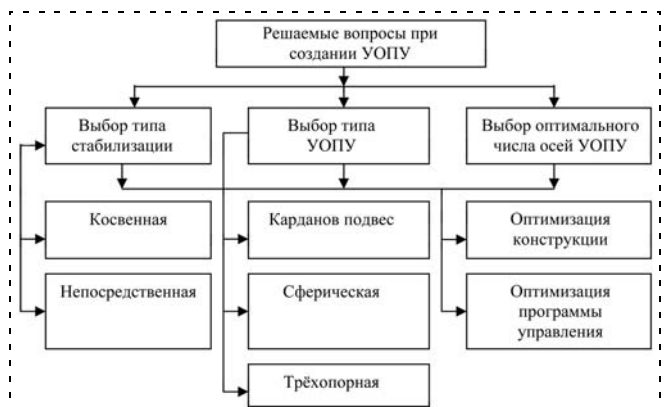


Рис. 10. Вопросы, решаемые при проектировании опорно-поворотных устройств

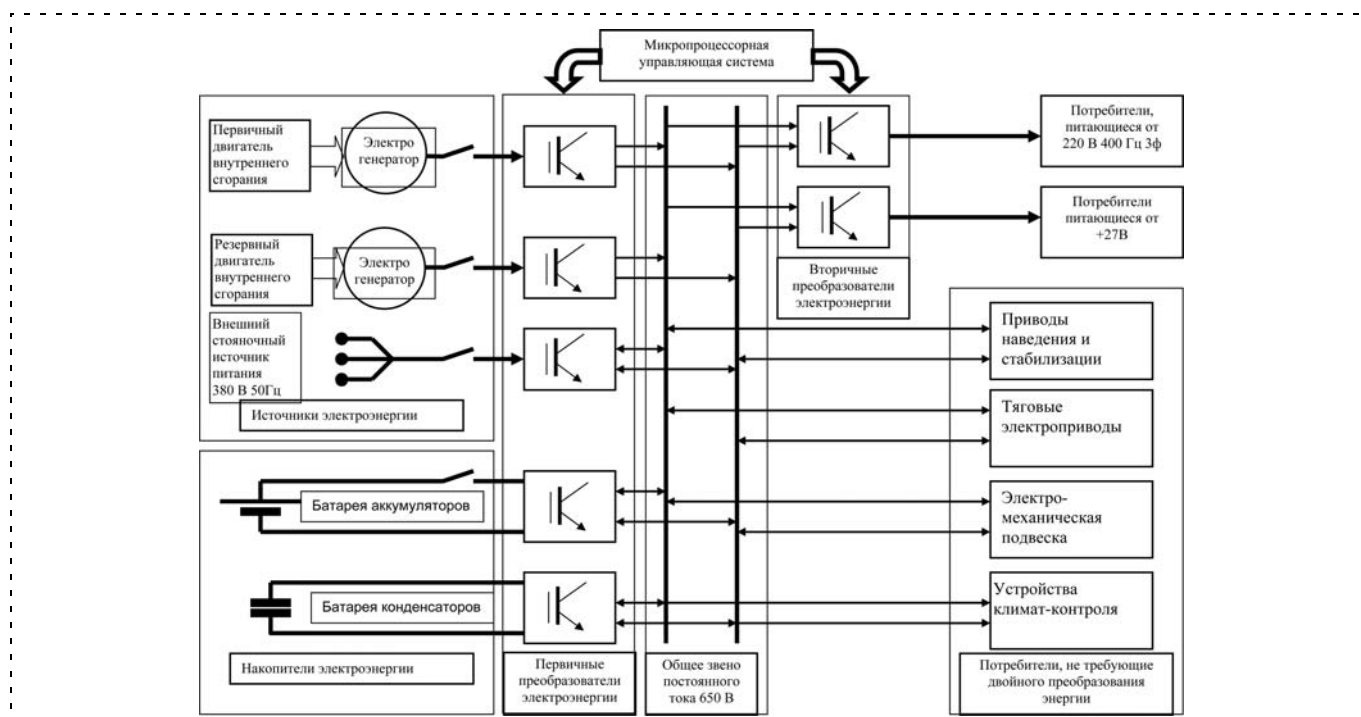


Рис. 11. Система электропитания мобильных комплексов

уже упомянутых необходимо решать еще дополнительную гамму вопросов (рис. 10): выбор типа стабилизации, выбор типа самого УОПУ, выбор оптимального числа осей УОПУ и др.

Идея взаимопроникаемости РП со смежными подсистемами комплекса особо ярко может выразиться при новом подходе к созданию СЭП [6, 7]. До последнего времени СЭП и РП проектировались независимо. В результате часто параметры СЭП не удовлетворяют создателей РП и не менее часто РП перегружали СЭП. А в режимах торможения РП вынуждены избыток энергии рассеивать в специальных устройствах, так как возврат ее в сеть невозможен. В результате такого проектирования энергетические показатели СЭП-РП далеко не удовлетворяют потребителей комплексов, особенно по КПД.

Опираясь на большой научно-технический задел по разработке РП, преобразователей энергии и СЭП для ветровой установки "Жаворонок", ФГУП "ВНИИ "Сигнал" предложил строить СЭП мобильных комплексов в соответствии со структурой, представленной на рис. 11.

Главная мысль заключается в том, чтобы все первичные источники энергии и накопители энергии через первичные преобразователи работали на единое общее звено постоянного тока. Иными словами, формируется единая сеть постоянного тока, к которой непосредственно или через вторичные преобразователи энергии подключаются потребители энергии: РП, тяговые электроприводы, устройства климатконтроля и т. д. Специальная микропроцессорная управляющая система перераспределяет энергию между потребителями в зависимости от их

загрузки. В такой СЭП будет обеспечиваться минимум потерь в любых режимах работы потребителей.

Несмотря на обилие проводимых расчетов, проектировщик всегда стремится провести максимум испытаний РП с использованием нагрузочных стендов, имитирующих воздействия на РП, близкие к реальным. Поэтому параллельно с созданием РП ведется проектирование и изготовление испытательных стендов. Принципы построения систем исследования, испытаний и контроля РП изложены достаточно подробно в работах [8, 9] и в данной статье не рассматриваются.

#### Основные пути повышения тактико-технических и эксплуатационных характеристик регулируемых приводов

Основной задачей при выполнении работ по созданию РП является обеспечение высоких показателей их качества и средств их обслуживания, позволяющих повысить тактико-технические и эксплуатационные характеристики финальных комплексов, а следовательно, и их конкурентоспособность на мировом рынке.

Сформулированная задача решается:

- **на этапе разработки путем**
  - ✓ учета опыта эксплуатации отечественных и зарубежных аналогов, требований и пожеланий головных предприятий и инозаказчика, технологических и производственных возможностей предприятий-смежников;
  - ✓ внедрения перспективной элементной базы, новых технологических решений (патенты, "ноу-хау") и современных технологий;

- ✓ обеспечения ресурса модернизации и адаптации продукции к растущим перспективным требованиям отечественного и экспортного использования;
  - ✓ обеспечения патентной защиты разрабатываемых изделий;
  - **на этапе изготовления за счет**
  - ✓ обеспечения жесткого контроля качества материалов, комплектующих, технологии изготовления деталей, приборов, изделий;
  - ✓ широкого использования автоматизированных систем контроля на всех этапах изготовления и испытаний продукции, гарантирующих достоверность полученных данных и сводящих к минимуму влияние человеческого фактора;
  - ✓ проведения в расширенном объеме автономных испытаний продукции, в том числе механических, климатических и полунатурных стендовых с воспроизведением характеристик объекта управления, внешних возмущающих факторов и аппаратно-информационного сопряжения РП с системами управления комплексов;
  - **на этапе отладки и испытаний в составе комплексов путем**
  - ✓ участия представителей предприятия в работах на всех этапах отладки комплекса, что позволяет оперативно решать возникающие вопросы и учесть в конструкции РП все особенности их эксплуатации в составе комплекса;
  - ✓ использования разрабатываемых предприятием автоматизированных средств отладки и контроля РП, что облегчает и ускоряет ввод изделий в эксплуатацию, повышает достоверность полученных данных, позволяет оперативно реализовать дополнительные требования к РП, возникающие в процессе отладки и испытания комплексов;
  - **на этапе эксплуатации за счет**
  - ✓ участия представителей предприятия в обслуживании изделий в процессе эксплуатации, что позволяет улучшить качество обслуживания РП и систематизировать информацию об изделиях в течение всего их жизненного цикла;
  - ✓ проведения технического обучения представителей заказчика;
  - ✓ поставки заказчику нестандартного оборудования и ремонтной документации, что облегчает эксплуатацию изделий, обеспечивает плановый ремонт на базах и в сервисных центрах, а также расширяет область сотрудничества.
- Такой подход к обеспечению жизненного цикла изделий позволяет поддерживать на высоком уровне их характеристики, а главное, постоянно их совершенствовать.
- Это можно наглядно продемонстрировать на примере создания и внедрения в жизнь трех поколений корабельных РП, построенных на базе двигателей переменного тока (асинхронных и синхронных):
- первое (с 1980 по 1990 г.) — РП с асинхронными двигателями, частотно-амплитудным управлением и преобразователями на базе тиристоры;

- второе (с 1990 по 2000 г.) — РП с асинхронными двигателями, векторным управлением и преобразователями на базе полностью управляемых транзисторов;
- третье (с 2000 г. по настоящее время) — РП с синхронными двигателями с высококоэффициентными магнитами на роторе, векторным управлением и преобразователями на базе IGBT модулей.

## Заключение

Современные условия требуют более глубокого подхода к проектированию регулируемых приводов:

- необходимо четко сформулировать область применения и назначение проектируемого РП, во многом определяющие конструктивный облик его приборов, а также функции каждой составной части РП, уйдя от примитивного классического их представления;
- особое внимание должно быть уделено схематическим решениям, учитывая достаточно сложные алгоритмы управления современными РП; при этом нужно стремиться к объединенному модульному исполнению ряда функциональных блоков;
- проектирование РП должно носить комплексный подход, предусматривающий оптимальное сочетание, взаимодействие и взаимопроникновение всех составных частей комплекса, прежде всего объекта регулирования и СЭП;
- параллельно с созданием РП должны создаваться комплексные испытательные стенды для настройки, исследований, контроля РП как на стадии создания опытных образцов, так и на стадии их серийного производства.

## Список литературы

1. Дронов Е. А., Новоселов Б. В., Зезин В. Г., Беляев А. А., Друговский А. Ю., Сомов И. А. Три поколения приводов переменного тока для зенитных корабельных комплексов ПВО // Оборонная техника. 2006. № 8. С. 32—44.
2. Новоселов Б. В. Механические передачи в следящем приводе // Обзор № 5550. НТЦ "Информтехника". Москва, 1993. С. 112.
3. Проектирование систем со сложными кинематическими цепями / И. Н. Богаенко, А. Д. Беленький, В. В. Новоселов и др. // Техника. 1996. С. 282.
4. Новоселов Б. В. Управляемые платформы с исполнительными механизмами линейного перемещения // Обзор № 5498. НТЦ "Информтехника". Москва. 1992. С. 92.
5. Кокшкин Н. Н., Новоселов Б. В. Новые разработки ФГУП ВНИИ "Сигнал" // Военные технологии. 2006. № 1. С. 68—69.
6. Новоселов Б. В., Друговский А. Ю., Зезин В. Г., Сомов И. А. Перспективные системы автономного электроснабжения мобильных комплексов // Оборонная техника. 2005. № 3—4. С. 50—58.
7. Зезин В. Г., Новоселов Б. В. Гибридная энергетическая установка транспортного средства с электрическим тяговым приводом // Производство электронных средств. 2003. С. 68—74.
8. Новоселов Б. В. Основные принципы построения систем исследования, испытаний и контроля следящих приводов // Сб. науч. тр. Владимирского регионального отделения, посвященный 10-летию создания АИН РФ. Владимир. 2001. С. 114—128.
9. Новоселов Б. В., Кессонов А. Н., Черкасов А. Н. Системы исследования, испытаний и контроля следящих приводов // Оборонная техника. 2006. № 8. С. 10—17.

**В. Т. Шароватов**, д-р техн. наук, проф.,  
**П. А. Лошицкий**, аспирант,  
 Балтийский государственный  
 технический университет "Военмех"  
 им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург  
 kaf\_n1@bstu.spb.ru

## Математическая модель силового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия оболочкового типа

*Предлагается математическая модель силового бесштокового оболочкового пневмоцилиндра одностороннего действия невозвратного типа, учитывающая свойства сжатого газа. В исследовании использованы основные уравнения газодинамики, описывающие поведение сжатого газа, которые подверглись упрощению и линеаризации с учетом опыта инженерной практики. Приведены результаты эксперимента и расчетный пример.*

**Ключевые слова:** силовой оболочковый элемент, газовые процессы, рабочая точка, математическая модель, скорость течения газа, пневмоцилиндр

**Постановка задачи.** Силовой бесштоковый пневмоцилиндр (СБПЦ) представляет собой совокупность двух элементов — электропневматического дроссельного распределителя (ДР) и силового оболочкового элемента (СОЭ) — силовой части (СЧ) СБПЦ.

Рассматриваемый СОЭ назван фирмой-разработчиком ("FESTO", Германия) пневматическим мускулом (ПМ) в связи с тем, что его внешний вид и принцип работы напоминают работу мускула-сгибателя.

К положительным качествам СБПЦ на базе ПМ следует отнести: бесшумность работы, отсутствие трущихся поверхностей, высокое быстродействие, герметичность конструкции, малую массу, простоту эксплуатации, низкую стоимость, плавность работы на "ползучих" скоростях.

СОЭ типа ПМ конструктивно выполнен из эластомера в форме герметичной трубчатой оболочки, торцы которой трансформированы в присоединительные элементы. Оболочка армирована нерастяжимыми нитями (НН), образующими ромбическую сетку. При подаче внутрь ПМ сжатого воздуха происходит деформация оболочки, что ведет к сокращению ПМ в продольном направлении и появлению значительного тянущего усилия. Отсюда следует, что вместе с дроссельным распределителем ПМ обладает свойствами СБПЦ одностороннего действия невозвратного типа.

Следует констатировать, что достоверная математическая модель силовой части СБПЦ одностороннего действия невозвратного типа, т. е. СОЭ в виде ПМ, в настоящее время отсутствует.

Вышеизложенное позволяет сформулировать цели данной статьи:

- предложить корректную математическую интерпретацию работы СЧ СБПЦ с учетом особенностей, связанных с протеканием динамических процессов в сжатом газе при обоснованных упрощениях и линеаризации основных уравнений газодинамики;
- на основании полученных результатов разработать линейную математическую модель СБПЦ одностороннего действия невозвратного типа.

**Основные зависимости, описывающие течение газов.** Используемые в гидро- и пневмосистемах рабочие среды в большинстве случаев можно считать ньютоновскими. Динамика этих сред описывается уравнением сохранения количества движения [2]:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho P_m - \text{grad} p + \left( \mu_V + \frac{\mu}{3} \right) \text{grad} \text{div} u + \mu \nabla^2 u, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей среды;  $u = (u_x, u_y, u_z) =$

$$= \left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right) — \text{ скорость движения малого объема}$$

газа с координатами  $(x(t), y(t), z(t))$ ;  $P_m$  — отнесенный к единице массы среды главный вектор массовых сил;  $p$  — давление;  $\mu_V$  и  $\mu$  — соответственно объемная и динамическая вязкость среды;  $t$  — время;  $\nabla^2$  — Лапласиан  $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ .

Полное математическое описание нестационарного движения реальной среды при заданных внешних силах кроме уравнения (1) должно содержать уравнение неразрывности среды, уравнение энергии, уравнение состояния среды, а также уравнения, характеризующие свойства среды.

Уравнение неразрывности сжимаемой среды имеет следующий вид [2]:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div} u = \rho q_m, \quad (2)$$

где  $q_m$  — скорость притока массы среды, отнесенная к единице массы.

Уравнение состояния среды устанавливает связь между давлением, плотностью и температурой  $T$  в данной точке потока [3]:

$$\rho = f(p, T). \quad (3)$$

Сжимаемость среды принято характеризовать коэффициентом сжимаемости [3]

$$\beta_{сж} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}.$$

В гидромеханике кроме динамической вязкости  $\mu$  используется также кинематическая вязкость  $\nu$ , связанная с динамической вязкостью соотношением [2]

$$\mu = \rho \nu. \quad (4)$$

Заметим, что объемная вязкость воздуха  $\mu_V$  близка к нулю.

**Основные зависимости, описывающие изменение усилия и геометрических параметров ПМ.** Усилие, развиваемое ПМ, а также взаимосвязь между радиусом оболочки и относительным сокращением ПМ  $\delta$ , описываются следующими выражениями [4]:

$$F_{\text{ПМ}} = 2p \frac{\pi r_{\text{H}}^2}{\sin \alpha_{\text{H}}} - 3\pi p r_{\text{T}}^2(z) - F_{\text{пот}}(r_{\text{T}}(z));$$

$$r_{\text{T}}(z) = r_{\text{H}} \frac{\sin(\arccos((1 - \delta(z)) \cos \alpha_{\text{H}}))}{\sin \alpha_{\text{H}}}; \quad (5)$$

$$\delta(z) = \frac{l_{\text{H}} - l_{\text{T}}}{l_{\text{H}}} \cdot 100,$$

где  $F_{\text{ПМ}}$  — усилие, развиваемое ПМ;  $F_{\text{пот}}$  — усилие, затрачиваемое на расширение оболочки ПМ (потери);  $r_{\text{T}}$ ,  $r_{\text{H}}$  — текущий и начальный радиус оболочки ПМ соответственно;  $\alpha_{\text{H}}$  — начальный угол укладки армирующих нитей в оболочке ПМ;  $\delta$  — относительное сокращение оболочки ПМ (в процентах);  $l_{\text{T}}$ ,  $l_{\text{H}}$  — текущая и начальная длина оболочки ПМ соответственно.

**Силовое взаимодействие ПМ и объекта управления.** Запишем уравнение сил, действующих на объект управления (ОУ) (здесь и далее аргумент  $t$  опущен для упрощения формы записи уравнений):

$$F_{\text{ПМ}} - F_{\text{H}} + F_{\text{возм}} - F_{\text{тр}} = m \frac{d^2(-l_{\text{T}})}{dt^2};$$

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} \frac{d(-l_{\text{T}})}{dt}; \quad (6)$$

$$F_{\text{ПМ}} = k_{\text{тр}} \frac{d(-l_{\text{T}})}{dt} + m \frac{d^2(-l_{\text{T}})}{dt^2} + F_{\text{H}} - F_{\text{возм}},$$

где  $F_{\text{H}}$  — усилие, затрачиваемое ПМ на преодоление нагружающих сил;  $F_{\text{возм}}$  — возмущающее воздействие на ПМ;  $F_{\text{тр}}$  — усилие, затрачиваемое ПМ на преодоление сил трения;  $m$  — масса ОУ, приве-

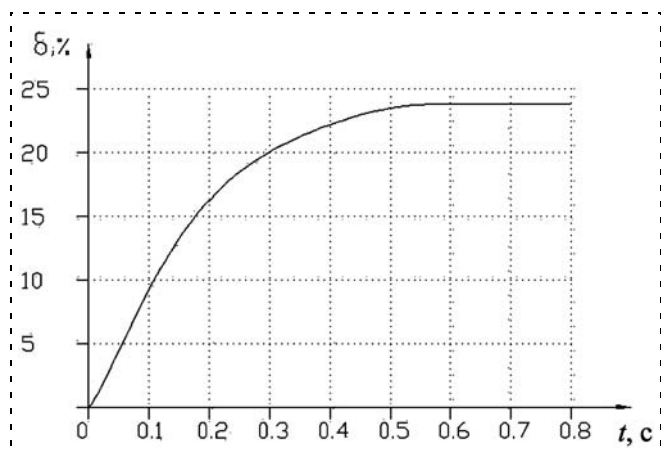


Рис. 1. График сокращения ПМ при подаче на его вход скачкообразного входного сигнала (имитатор нагрузки — пневмоцилиндр)

денная к продольной оси ПМ;  $k_{\text{тр}}$  — коэффициент вязкого трения.

В качестве положительного принимается направление сокращения ПМ.

Таким образом, используя (1)—(3), (5) и (6), имеем следующую систему уравнений, описывающих динамику ПМ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{du}{dt} = \rho P_m - \text{grad } p + \left( \mu_V + \frac{\mu}{3} \right) \text{grad div } u + \mu \nabla^2 u; (a) \\ \frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div } u = \rho q_m; (b) \\ \rho = f(p, T); (c) \\ r_{\text{T}} = \frac{r_{\text{H}}}{\sin \alpha_{\text{H}}} \sin(\arccos((1 - \delta) \cos \alpha_{\text{H}})); (d) \\ F_{\text{ПМ}} = 2p \frac{\pi r_{\text{H}}^2}{\sin^2 \alpha_{\text{H}}} - 3\pi p r_{\text{T}}^2 - F_{\text{пот}}(r_{\text{T}}); (e) \\ F_{\text{ПМ}} = k_{\text{тр}} \frac{d(-l_{\text{T}})}{dt} + m \frac{d^2(-l_{\text{T}})}{dt^2} + F_{\text{H}} - F_{\text{возм}}; (f) \\ \delta(z) = \frac{l_{\text{H}} - l_{\text{T}}}{l_{\text{H}}} \cdot 100. (g) \end{array} \right. \quad (7)$$

Выполним ряд упрощений и линеаризацию уравнений, входящих в эту систему, в соответствии с опытом инженерной практики.

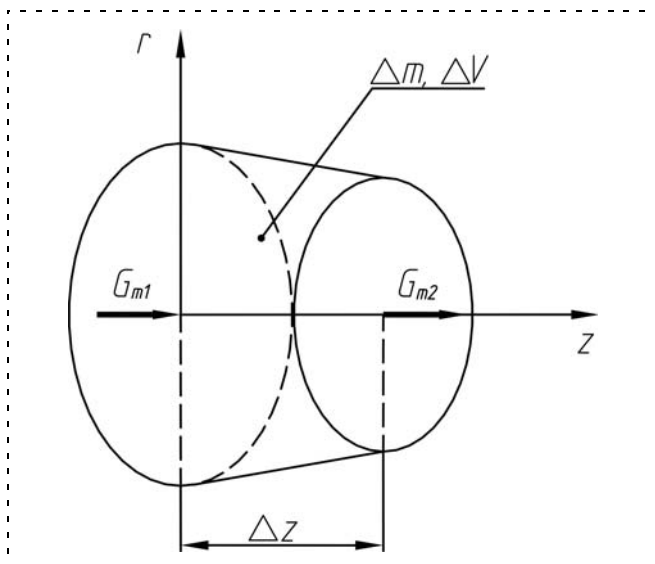
**Линеаризация выражения (7а).** При описании движения рабочей среды считаем поток газа (сжатого воздуха) осесимметричным, а переходными процессами, происходящими в направлениях, перпендикулярных продольной оси ПМ, пренебрегаем, поскольку длина ПМ много больше радиуса его оболочки. Следовательно, скорости протекания газодинамических процессов в этих направлениях также существенно различны. Изменения температуры воздуха при работе ПМ принимаем незначительными, поэтому в данном случае кинематическую вязкость  $\nu$  воздуха можно считать постоянной.

Тогда уравнение (7а) с учетом (4) примет вид:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{4\nu}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (8)$$

Как показывает эксперимент [5] (рис. 1), переходный процесс при сокращении ПМ можно условно разделить на три этапа: разгон, движение с постоянной скоростью и замедление с последующей остановкой.

Обоснуем некоторые допущения, опираясь на представленный рис. 1. Наличие второго этапа свидетельствует о том, что при сокращении ПМ динамические газовые процессы в рабочей среде можно при определенных условиях считать установившимися. Такое допущение возможно, поскольку в противном случае интенсивно протекающие переходные газовые процессы внутри оболочки ПМ при-



**Рис. 2. Элементарный фрагмент оболочки ПМ:**  
 $\Delta m$  — элементарная масса;  $\Delta V$  — элементарный объем;  $G_{m1}$  и  $G_{m2}$  — массовый расход газа через сечения оболочки ПМ

вели бы к искажению линейного участка на рис. 1. Также можно утверждать, что при сокращении ПМ на втором этапе расширение оболочки происходит равномерно по всей длине, т. е. приращение массы газа в разных частях оболочки происходит примерно одинаково. В противном случае перераспределение масс газа по длине оболочки ПМ неизбежно привело бы к соответствующим динамическим газовым процессам.

Рассмотрим изменение массового расхода газа при его движении внутри гибкой армированной оболочки, радиус  $r$  которой изменяется в функции от координаты  $z$ , направленной вдоль продольной оси ПМ (рис. 2).

Массовый расход газа через некоторое сечение оболочки радиуса  $r$  будем обозначать  $G_m$ . Тогда для  $\Delta m$  можно записать следующее выражение:

$$\frac{d\Delta m}{dt} = G_m(z, t) - G_m(z + \Delta z, t), \quad (9)$$

где  $G_m(z, t)$  — массовый расход газа, втекающего в объем  $\Delta V$ ;  $G_m(z + \Delta z, t)$  — массовый расход газа, вытекающего из объема  $\Delta V$ .

Разделив в выражении (9) правую и левую части уравнения на  $\Delta z$  и устремив  $\Delta z$  к 0, получим:

$$\frac{dm'}{dt} = -\frac{\partial G_m}{\partial z}, \quad (10)$$

где  $m'$  — масса газа, приходящаяся на единицу длины оболочки ПМ.

С учетом условия равномерности приращения массы по длине оболочки ПМ можно записать следующее соотношение:

$$\frac{\partial G_m}{\partial z} \approx \text{const.} \quad (11)$$

Так как оболочка герметична, то значение массового расхода газа  $G_m$ , направленного вдоль оси  $z$  ПМ, у его противоположного торца должно равняться нулю. Соответственно, выражение (11) примет вид

$$\frac{\partial G_m}{\partial z} \approx -\frac{G_{m0}}{l_T}, \quad (12)$$

где  $G_{m0}$  — значение массового расхода поступающего в ПМ газа.

Для массового расхода газа, с учетом принятых допущений, существует следующее выражение [2]:

$$G_m = \pi r^2 u \rho. \quad (13)$$

Как показывает эксперимент [5], при работе ПМ изменение радиуса оболочки по его длине незначительно. Соответственно линеаризация таких величин, как давление, плотность и радиус оболочки относительно координаты  $z$ , не внесет существенных погрешностей в расчеты и, таким образом,

$$\begin{aligned} \rho(z) &= \rho_{cp} - \Delta \rho + \frac{2\Delta \rho}{l_T} z; \\ r(z) &= r_{cp} - \Delta r + \frac{2\Delta r}{l_T} z; \\ p(z) &= p_{cp} - \Delta p + \frac{2\Delta p}{l_T} z, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\rho_{cp}$ ,  $r_{cp}$ ,  $p_{cp}$  — средние значения плотности газа, радиуса оболочки и давления соответственно.

Поскольку оболочка ПМ герметична, то у противоположного конца оболочки массовый расход газа  $G_m$  равняется нулю. Согласно (13) равенство нулю массового расхода газа предполагает равенство нулю скорости газа у противоположного торца ПМ, тогда в соответствии с [3], будем считать, что при сокращении ПМ на противоположном конце оболочки образуется область повышенного давления, которая поддерживается набегающим потоком газа и способствует его торможению.

Поскольку, как было указано выше, процесс течения газа в ПМ рассматриваем вдоль только одной координаты и считаем течение газа установившимся, то  $u = \frac{dz}{dt}$  и, умножая (8) на  $dz$ , получим

$$u du = -\frac{1}{\rho} dp + \frac{4v}{3} d\left(\frac{du}{dz}\right). \quad (15)$$

Частная производная для скорости газа с учетом (13) равняется

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{\pi r^2 \rho} \left( \frac{\partial G_m}{\partial z} - 2 \frac{G_m}{r} \frac{\partial r}{\partial z} - \frac{G_m}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right). \quad (16)$$

Подставляя (12) и (14), получим

$$\frac{du}{dz} = -\frac{1}{l_T \pi r^2 \rho} \left( G_{m0} + 2 G_m \frac{2\Delta r}{r} + G_m \frac{2\Delta \rho}{\rho} \right). \quad (17)$$



Проинтегрируем (15) по длине ПМ. Значение интеграла первого слагаемого возьмем из [2] и для адиабатического процесса имеем

$$-\int_0^{l_T} \frac{1}{\rho} dp = \frac{k}{k-1} \frac{p_{cp} - \Delta p}{\rho_{cp} - \Delta \rho} \left( 1 - \left( \frac{p_{cp} + \Delta p}{p_{cp} - \Delta p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right), \quad (18)$$

где  $k$  — показатель адиабаты (для воздуха он равен 1.4).

Таким образом, интегрирование (15) дает:

$$-\frac{u_0^2}{2} = \frac{k}{k-1} \frac{p_{cp} - \Delta p}{\rho_{cp} - \Delta \rho} \left( 1 - \left( \frac{p_{cp} + \Delta p}{p_{cp} - \Delta p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) + \frac{4\nu}{3\pi} \left( \frac{\partial u}{\partial z_{z=l_T}} - \frac{\partial u}{\partial z_{z=0}} \right). \quad (19)$$

С учетом (16)–(18) преобразуем данное равенство к виду

$$\left( \frac{G_{m0}}{\pi(r_{cp} - \Delta r)^2(\rho_{cp} - \Delta \rho)} \right)^2 = \frac{2k}{k-1} \frac{p_{cp} - \Delta p}{\rho_{cp} - \Delta \rho} \left( \left( \frac{p_{cp} + \Delta p}{p_{cp} - \Delta p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) - \frac{4\nu}{3\pi} \frac{G_{m0}}{l_T} \times \left( \frac{1 + \frac{4\Delta r}{r_{cp} - \Delta r} + \frac{2\Delta \rho}{\rho_{cp} - \Delta \rho}}{(r_{cp} - \Delta r)^2(\rho_{cp} - \Delta \rho)} - \frac{1}{(r_{cp} + \Delta r)^2(\rho_{cp} + \Delta \rho)} \right). \quad (20)$$

Так как отклонения  $\Delta r$ ,  $\Delta \rho$  и  $\Delta p$  взаимосвязаны, то, зная величину  $G_{m0}$ , можно определить эти отклонения относительно координаты  $z$  и, с учетом выражения (20), построить зависимость изменения скорости газа по длине ПМ.

Используя (19) и (20), определим изменение скорости газа в функции от длины оболочки ПМ при разных значениях массового расхода газа  $G_{m0}$ , поступающего в ПМ (рис. 3).

Если рассмотреть полученные зависимости в относительных единицах, т. е. как отношение текущей скорости газа к его начальной скорости, то получим следующий результат (рис. 4).

Как видно из рис. 4, относительные изменения скорости газа при разных значениях расхода газа практически совпадают. Это означает, что для нахождения  $\partial u / \partial z$  можно воспользоваться линейной зависимостью

$$\frac{\partial u}{\partial z} = k_u \frac{u_{z0}}{l_T}, \quad (21)$$

где  $k_u$  — коэффициент пропорциональности;  $u_{z0}$  — начальная скорость газа.

Это выражение дает возможность максимально просто определить частную производную скорости газа  $u$  по координате  $z$ .

**Линеаризация выражения (7b).** С учетом ранее принятых допущений, получим следующее выражение

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial z} = \rho q_m. \quad (22)$$

Величина  $q_m$  неизвестна. Найдем ее, используя рис. 2.

Определим массу газа в элементарном объеме (рис. 2) и ее изменение во времени. При этом не будем забывать, что величина  $\Delta z$  зависит от изменения радиуса оболочки ПМ. Имея в виду, что

$$\Delta m = \pi r^2 \Delta z \rho,$$

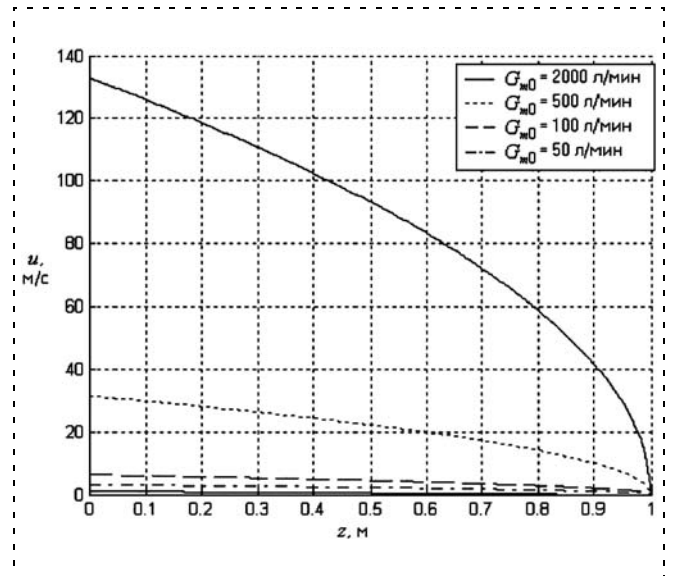


Рис. 3. Изменение скорости газа в оболочке в функции от ее длины при различных значениях  $G_{m0}$

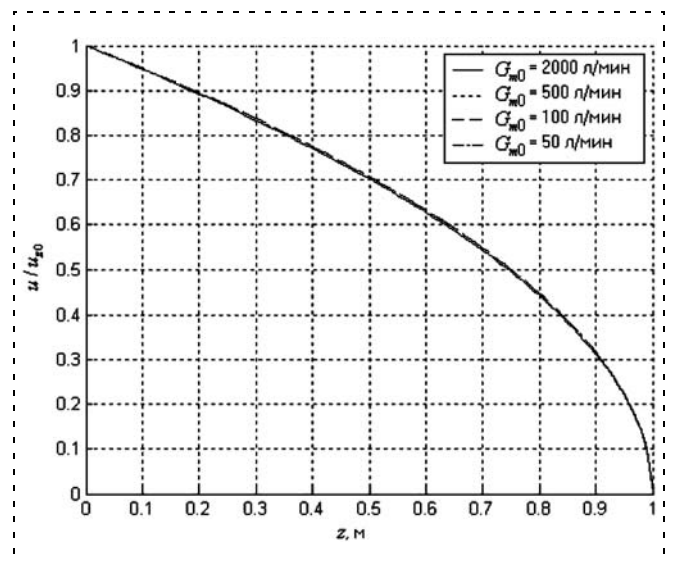


Рис. 4. Относительное изменение скорости газа в оболочке при различных значениях  $G_{m0}$

получаем

$$\frac{d\Delta m}{dt} = \pi r^2 \rho \frac{d\Delta z}{dt} + 2\pi r \Delta z \rho \frac{dr}{dt} + \pi r^2 \Delta z \frac{d\rho}{dt}. \quad (23)$$

Используя геометрические соотношения, представленные в [4], найдем изменение величины  $\Delta z$  от радиуса оболочки ПМ:

$$\Delta z = \Delta z_H \frac{\cos\left(\arcsin\left(\frac{r}{r_H} \sin \alpha_H\right)\right)}{\cos \alpha_H}$$

или

$$\Delta z = \frac{\Delta z_H}{\cos \alpha_H} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_H}\right)^2 \sin^2 \alpha_H}, \quad (24)$$

где  $\Delta z_H$  — значение величины  $\Delta z$  при угле укладки  $\alpha_H$  НН в оболочке ПМ.

Используя (23) и (24), преобразуем (9) к виду

$$\begin{aligned} G_m(z, t) - G_m(z + \Delta z, t) = \\ = \pi r^2 \rho \frac{d\Delta z}{dt} + 2\pi r \Delta z \rho \frac{dr}{dt} + \pi r^2 \Delta z \frac{d\rho}{dt}. \end{aligned} \quad (25)$$

Разделим правую и левую часть на  $\Delta z$ :

$$\begin{aligned} - \frac{G_m(z + \Delta z, t) - G_m(z, t)}{\Delta z} = \\ = - \frac{\pi r^3 \rho \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \frac{dr}{dt} + 2\pi r \rho \frac{d\rho}{dt} + \pi r^2 \frac{d\rho}{dt}. \end{aligned}$$

При  $\Delta z \rightarrow 0$  получим

$$-\frac{\partial G_m}{\partial z} = \pi r \left( 2 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr}{dt} + \pi r^2 \frac{d\rho}{dt}. \quad (26)$$

Подставив в (26) соотношение (12), имеем

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \left( 2 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr}{dt} + \\ + \rho \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{2u\rho}{r} \frac{\partial r}{\partial z} = 0 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial z} = \\ = -\rho \left( 2 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr}{dt} - \frac{2\rho}{r} u \frac{\partial r}{\partial z} - u \frac{\partial \rho}{\partial z}. \end{aligned} \quad (27)$$

В итоге, неизвестную  $q_m$  в (22) можно найти следующим образом:

$$q_m = -\frac{1}{r} \left( 2 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr}{dt} - \frac{2u}{r} \frac{\partial r}{\partial z} - \frac{u}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}. \quad (28)$$

Используя (14), преобразуем (28) к виду

$$\frac{2}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{r} \left( 4 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr}{dt} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \quad (29)$$

Подставим в (29) выражение (21) и сведем два первых уравнения в системе (7) к одному:

$$\frac{2}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{r} \left( 4 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr}{dt} + k_u \frac{u_{z0}}{l_T} = 0. \quad (30)$$

Выражение (30) определимо только для конкретной точки, расположенной на продольной оси ПМ  $z$ , для других точек коэффициент  $k_u$  будет отличаться и, следовательно, будет другое решение для (30).

С учетом изложенного трансформируем (30) для точки, соответствующей половине длины оболочки:

$$\frac{2}{\rho_{cp}} \frac{d\rho_{cp}}{dt} + \frac{1}{r_{cp}} \left( 4 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H} \right) \frac{dr_{cp}}{dt} - k_u \frac{u_{z0}}{l_T} = 0. \quad (31)$$

Для упрощения этого выражения примем значения плотности, радиуса и длины оболочки постоянными величинами, зависящими от выбранной нами рабочей точки (РТ), которая определяется нейтральным положением ОУ, и будем считать, что работа ПМ как силовой части СБПЦ происходит в непосредственной близости от этой РТ. Тогда

$$\frac{2}{\rho_p} \frac{d\rho_{cp}}{dt} + \frac{k_r}{r_p} \frac{dr_{cp}}{dt} - k_u \frac{u_{z0}}{l_p} = 0, \quad (32)$$

где  $k_r = 4 - \frac{r^2 \sin^2 \alpha_H}{r_H^2 - r^2 \sin^2 \alpha_H}$ ;  $\rho_p$  — плотность газа для выбранной РТ;  $r_p$  — радиус оболочки для выбранной РТ;  $l_p$  — длина оболочки для выбранной РТ.

Для приближенного определения  $u_{z0}$  воспользуемся выражением

$$u_{z0} \approx \frac{Q}{S_p}, \quad (33)$$

где  $Q$  — расход газа на входе в ПМ;  $S_p$  — площадь поперечного сечения оболочки ПМ для выбранной РТ.

Выражение (32) с учетом (33) примет вид

$$\frac{2}{\rho_p} \frac{d\rho_{cp}}{dt} + \frac{k_r}{r_p} \frac{dr_{cp}}{dt} = k_u \frac{Q}{V_p}, \quad (34)$$

где  $V_p$  — объем оболочки для выбранной РТ.

Таким образом, (34) заменяет два первых уравнения в системе (7) и вполне подходит для построения линейной математической модели СБПЦ оболочкового типа для выбранной РТ.

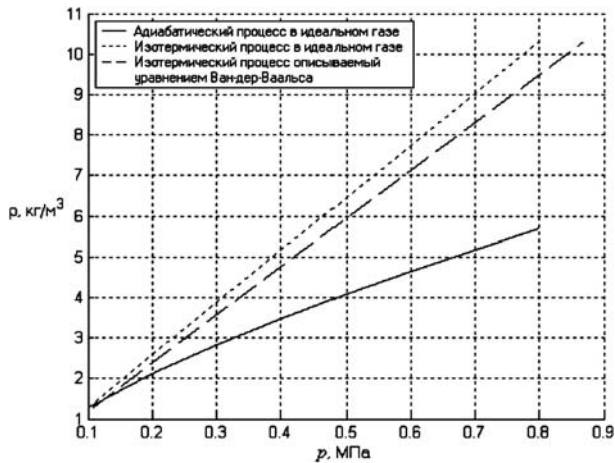


Рис. 5. Графики изменения плотности газа от давления

**Линеаризация выражения (7с).** Рассмотрим уравнение состояния газа при разных процессах (рис. 5) [3].

Данные зависимости в рабочей области практически линейны, поэтому после их линеаризации уравнение состояния газа примет вид

$$\begin{aligned} p(\rho) &= k_{pp}(\rho - \rho_p) + p_p; \\ p(\rho) &= k_{pp}\rho + p_0, \end{aligned} \quad (35)$$

где  $k_{pp}$  — коэффициент пропорциональности, связывающий изменение давления и плотности.

Таким образом, выражение (35) можно использовать вместо (7с), предварительно определив используемые в нем коэффициенты для РТ.

**Линеаризация выражения (7d).** Для этого разобьем оболочку на небольшие участки, для каждого из которых справедливы выражения

$$r_T(z) = r_H \frac{\sin(\arccos((1 - \Delta\delta(z))\cos\alpha_H))}{\sin\alpha_H}$$

или

$$\Delta\delta(z) = 1 - \frac{\cos(\arcsin(r_T(z)/r_H\sin\alpha_H))}{\cos\alpha_H}. \quad (36)$$

Полную величину относительного сокращения оболочки можно найти путем интегрирования ее изменения по длине оболочки:

$$\delta = \int_0^{l_T} \Delta\delta dz.$$

Используя (36), построим зависимость между радиусом оболочки  $r$  и величиной относительного сокращения  $\delta$  на некотором участке (рис. 6).

Нетрудно заметить, что эти зависимости (рис. 6) имеют практически линейный характер и погрешность при их линеаризации будет незначительна.

В итоге, выражение (36) можно заменить следующим соотношением:

$$\Delta\delta = k_{r\delta}(r_T - r_p) + \Delta\delta_p. \quad (37)$$

Для данной линейной зависимости можно не вычислять интеграл по длине оболочки, а приближенно найти его для среднего радиуса оболочки:

$$\delta = k_{r\delta}(r_{cp} - r_p) + \delta_p, \quad (38)$$

где  $k_{r\delta}$  — коэффициент пропорциональности между радиусом оболочки и ее относительным сокращением.

На основании выражения (38) найдем зависимость изменения среднего радиуса оболочки ПМ от сокращения ПМ:

$$r_{cp} = \frac{\delta}{k_{r\delta}} + r_0. \quad (39)$$

Имея в виду эти соображения, (7d) заменим на (39).

**Линеаризация выражения (7е).** Линеаризованное выражение имеет вид:

$$F_{ПМ} = k_F(k_{\delta p}p - \delta),$$

где коэффициенты  $k_F$  и  $k_{\delta p}$  можно найти, используя статические характеристики, приведенные в [4]. При этом значение этих коэффициентов будет равняться тангенсу угла наклона касательных, проведенных к статическим характеристикам в выбранной РТ.

Уравнения (7f) и (7g) не требуют линеаризации.

При линеаризации системы (7) не был учтен имеющий место в реальности краевой эффект, за-

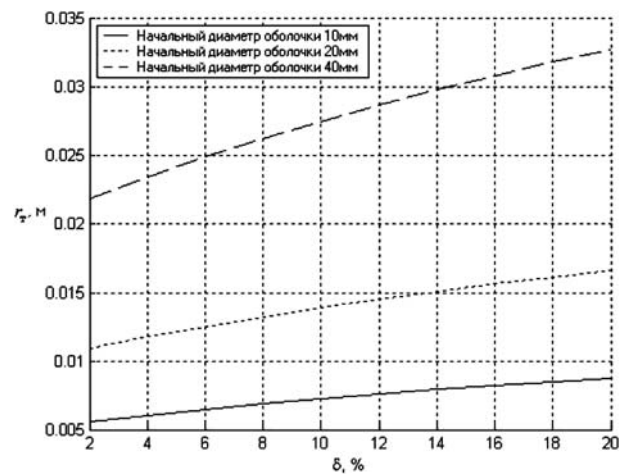


Рис. 6. Зависимость между радиусом оболочки и ее сокращением

ключающийся в том, что при сокращении ПМ около мест крепления оболочки образуется переход от начального диаметра оболочки к его текущему значению, которое и используется в выражении (13). Учет краевого эффекта целесообразно выполнять, используя зависимость

$$V_p = k_{VV} \pi r_p^2 l_p,$$

где  $V_p$  — внутренний объем ПМ, соответствующий принятой РТ;  $k_{VV}$  — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, путем линеаризации системы (7) и учета различных факторов, влияющих на динамику ПМ, получаем систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{\rho_p} \frac{d\rho_{cp}}{dt} + \frac{k_r}{r_p} \frac{dr_{cp}}{dt} = k_u \frac{Q}{V_p}; \\ p(\rho) = k_{pp} r + p_0; \\ r_{cp} = \frac{\delta}{k_{r\delta}} + r_0; \\ F_{ПМ} = k_F (k_{\delta p} p - \delta); \\ F_{ПМ} - F_H + F_{ВОЗМ} = -k_{тр} \frac{dl_T}{dt} - m \frac{d^2 l_T}{dt^2}; \\ \delta = \frac{l_H - l_T}{l_H} \cdot 100. \end{array} \right.$$

Преобразуя эту систему и применяя преобразование Лапласа, получим

$$\begin{aligned} k_F k_u \frac{k_{\delta p} k_{pp} \rho_p}{2 V_p} \frac{Q(s)}{s} - F_H(s) + F_{ВОЗМ}(s) = \\ = \left( s \frac{k_{тр} l_H}{100} + s^2 \frac{m l_H}{100} + k_F \left( k_{\delta p} \frac{k_{pp} \rho_p k_r}{2 k_{r\delta} r_p} + 1 \right) \right) \delta(s). \end{aligned}$$

Для упрощения расчетов данное выражение перепишем в виде

$$\begin{aligned} k_F k_{\delta p} \frac{C_1}{V_p} \frac{Q(s)}{s} - F_H(s) + F_{ВОЗМ}(s) = \\ = \left( s \frac{k_{тр} l_H}{100} + s^2 \frac{m l_H}{100} + k_F (k_{\delta p} C_1 C_2 + 1) \right) \delta(s); \\ C_1 = \frac{k_u k_{pp} \rho_p}{2}; \\ C_2 = \frac{k_r}{k_u k_{r\delta} r_p}. \end{aligned}$$

На основе принципа суперпозиции находим передаточную функцию по управлению для СБПЦ одностороннего действия невозвратного типа:

$$\begin{aligned} W_{упр}(s) = \frac{\delta(s)}{U(s)} = \frac{k_{упр}}{s(T^2 s^2 + 2T\xi s + 1)} W_{ДР}(s); \\ k_{упр} = \frac{k_{\delta p} C_1}{(k_{\delta p} C_1 C_2 + 1) V_p}; T = \sqrt{\frac{0,01 m l_H}{k_F (k_{\delta p} C_1 C_2 + 1)}}; \\ \xi = \frac{k_{тр}}{2} \sqrt{\frac{0,01 l_H}{m k_F (k_{\delta p} C_1 C_2 + 1)}}, \end{aligned}$$

где  $W_{ДР}(s)$  — передаточная функция дроссельного распределителя, без которого нельзя реализовать СБПЦ;  $U(s)$  — изображение по Лапласу напряжения (тока) на входе в ДР.

Передаточная функция по возмущению:

$$\begin{aligned} W_{ВОЗМ}(s) = \frac{\delta(s)}{F_{ВОЗМ}(s)} = \frac{k_{ВОЗМ}}{(T^2 s^2 + 2T\xi s + 1)}; \\ k_{ВОЗМ} = \frac{1}{k_F (k_{\delta p} C_1 C_2 + 1)}. \end{aligned}$$

Передаточная функция по усилию:

$$W_y(s) = \frac{F_H(s)}{F_{ВХ}(s)} = \frac{k_y}{s} W_{ДР}(s) W_{ЧЭ}(s); k_y = k_F k_{\delta p} \frac{C_1}{V_p},$$

где  $F_{ВХ}(s)$  — изображение по Лапласу задающего усилия на входе в систему управления;  $W_{ЧЭ}(s)$  — передаточная функция чувствительного элемента.

Достоверность полученной модели БСПЦ подтверждена экспериментальными исследованиями.

**Выводы.** Предложенная методика не только повышает достоверность расчетов, но и предлагает ряд формульных зависимостей и графиков, упрощающих процедуру расчетов, что обеспечивает широкую возможность практического применения СБПЦ оболочкового типа. Данная передаточная функция является базовой для вывода передаточных функций других типов.

#### Список литературы

1. Липатов А. А., Марти А. Н., Шароватов В. Т. Исследование статики и динамики оболочкового гидро-пневмодвигателя // Изв. вузов. Машиностроение. 2002. № 4. С. 36–49.
2. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2002. 320 с.
3. Черный Г. Г. Газовая динамика: Учебник для университетов и вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 424 с.
4. Лошицкий П. А., Шароватов В. Т. Идентификация некоторых параметров математической модели двигателя оболочкового типа // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. № 12. С. 56–63.
5. Липатов А. А., Шароватов В. Т. Экспериментальное исследование исполнительного двигателя оболочкового типа // Изв. вузов. Машиностроение. 2005. № 3. С. 17–23.

**А. И. Коршунов**, д-р техн. наук, зав. каф.,  
Военно-морской институт радиоэлектроники  
им. А. С. Попова  
a.i.korshunov@mail.ru

## Частотный пуск синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе

*Рассмотрен процесс равноускоренного частотного пуска синхронного двигателя на холостом ходу и при постоянном моменте нагрузки. На фазовой плоскости двигателя, по оси абсцисс которой откладывается отставание ротора от поля статора, определена область устойчивости равноускоренного разгона.*

**Ключевые слова:** синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе, частотный пуск

### Введение

Невозможность асинхронного пуска вследствие отсутствия обмоток на роторе синхронного двигателя (СД) вызывает интерес к частотному синхронному пуску. Он осуществляется при питании статорной обмотки от автономного инвертора путем плавного повышения частоты. Очевидно, что при слишком быстром повышении частоты СД будет выпадать из синхронизма, и это делает невозможным его пуск. Слишком медленное повышение частоты снижает быстродействие привода. Поэтому исследование процесса частотного пуска СД имеет важное практическое значение.

Отсутствие обмоток на роторе СД исключает возможность контроля скорости вращения и угла поворота ротора, что обычно осуществляется при пуске СД [1]. Поэтому основная задача, рассматриваемая в данной статье — исследование возможностей синхронного равноускоренного пуска без контроля углового положения и скорости ротора.

### Математическая модель частотного пуска СД

Положим, что статор СД питается от трехфазного генератора синусоидального тока управляемой частоты. В этом случае при обычных допущениях можно описать разгон СД следующим дифференциальным уравнением:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M_m \sin(p(\varphi - \theta)) - M_H, \quad (1)$$

где  $J$  — суммарный момент инерции привода;  $M_m$  — максимальный синхронизирующий момент двигателя;  $M_H$  — момент нагрузки;  $p$  — число пар полюсов;  $\theta$  и  $\varphi$  — углы поворота ротора и поля статора в угловых радианах.

Обозначив  $\zeta = p\theta$ ,  $\xi = p\varphi$  углы поворота ротора и поля статора в электрических радианах (эл. рад), уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \zeta}{dt^2} = M_m \sin(\xi - \zeta) - M_H,$$

$$\text{или } \frac{d^2 \zeta}{dt^2} = \varepsilon_m \sin(\xi - \zeta) - \frac{p M_H}{J}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_m = \frac{p M_m}{J}$  — максимальное ускорение в эл. рад/с<sup>2</sup>.

Положим  $M_H = 0$ . Этот гипотетический случай близок к реальному, например, при "вентиляторной" нагрузке

$$M_H = k_v \left| \frac{d\theta}{dt} \right| \frac{d\theta}{dt}, \quad k_v = \text{const} \quad (3)$$

на начальном этапе пуска ( $d\theta/dt \approx 0$ ). При этом уравнение (2) упрощается до вида

$$\frac{d^2 \zeta}{dt^2} = \varepsilon_m \sin(\xi - \zeta). \quad (4)$$

### Анализ пуска на холостом ходу

Для лучшего понимания процессов рассмотрим вначале достаточно медленный пуск, при котором разность  $\xi - \zeta$  настолько мала, что можно с высокой точностью выполнить замену

$$\varepsilon_m \sin(\xi - \zeta) \approx \varepsilon_m (\xi - \zeta). \quad (5)$$

В случае (5) нелинейное дифференциальное уравнение (4) становится линейным неоднородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 \zeta}{dt^2} + \varepsilon_m \zeta = \varepsilon_m \xi, \quad (6)$$

решение которого не вызывает никаких затруднений. Положим

$$\xi = \varepsilon t^2 / 2, \quad (7)$$

что соответствует равномерному повышению частоты при пуске СД.

Нетрудно проверить непосредственной подстановкой, что выражение

$$\zeta = \varepsilon \frac{t^2}{2} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \quad (8)$$

представляет собой частное решение уравнения (6). Физически это соответствует равноускоренному разгону ротора при постоянном отставании его от поля статора, обеспечивающем необходимый вращающий (синхронизирующий) момент СД.

Общее решение однородного уравнения

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} + \varepsilon_m\zeta = 0, \quad (9)$$

как известно, имеет вид

$$\zeta(t) = \zeta_m \sin(\sqrt{\varepsilon_m}t + \psi), \quad (10)$$

где  $\zeta_m$  — амплитуда и  $\psi$ -фаза свободных колебаний, зависящие от начальных условий.

Таким образом, решение уравнения (6) имеет вид

$$\zeta(t) = \zeta_m \sin(\sqrt{\varepsilon_m}t + \psi) + \varepsilon t^2/2 - \varepsilon/\varepsilon_m. \quad (11)$$

Если пуск проводится из согласованного состояния при неподвижном роторе, т. е. при нулевых начальных условиях (НУ)

$$\zeta(0) = 0, \quad \frac{d\zeta}{dt}(0) = 0, \quad (12)$$

из (11) и (12) получаем систему двух линейных уравнений для определения  $\zeta_m$  и  $\psi$ :

$$\begin{cases} \zeta_m \sin \psi - \varepsilon/\varepsilon_m = 0; \\ \sqrt{\varepsilon_m} \zeta_m \cos \psi = 0, \end{cases} \quad (13)$$

решение которой дает  $\psi = \pi/2$ ,  $\zeta_m = \varepsilon/\varepsilon_m$ .

Подставляя полученный результат в (11), находим

$$\begin{aligned} \zeta(t) &= (\varepsilon/\varepsilon_m) \cos(\sqrt{\varepsilon_m}t) + \varepsilon t^2/2 - \varepsilon/\varepsilon_m; \\ d\zeta/dt &= \varepsilon t - (\varepsilon/\sqrt{\varepsilon_m}) \sin(\sqrt{\varepsilon_m}t). \end{aligned} \quad (14)$$

Из выражений (14) очевидно, что на процесс равномерного разгона накладываются собственные гармонические колебания СД.

Можно полностью исключить собственные колебания СД при разгоне, выбрав необходимое начальное значение

$$\zeta(0) = -\varepsilon/\varepsilon_m. \quad (15)$$

В этом случае в правой части первого уравнения системы (13) вместо 0 следует записать выражение (15). Вследствие этого решением системы уравнений (13) становится:  $\zeta_m = 0$ , при неопределенном  $\psi$ , что дает

$$\zeta(t) = \varepsilon t^2/2 - \varepsilon/\varepsilon_m, \quad d\zeta/dt = \varepsilon t. \quad (16)$$

Весьма полезным оказывается рассмотрение переходного процесса на фазовой плоскости с координатами

$$x = \xi - \zeta, \quad y = \frac{dx}{dt} = \frac{d\xi}{dt} - \frac{d\zeta}{dt}, \quad (17)$$

где  $x$  — отставание ротора от поля статора, а  $y$  — скорость его изменения.

В рассматриваемом случае с учетом (7) получаем

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \varepsilon - \frac{d^2\zeta}{dt^2} \quad \text{или} \quad \frac{d^2\zeta}{dt^2} = \varepsilon - \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (18)$$

Подстановка (17), (18) в (6) дает

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \varepsilon - \varepsilon_m x \quad \text{или} \quad y \frac{dy}{dx} = \varepsilon - \varepsilon_m x. \quad (19)$$

Интегрируя (19), получаем

$$y^2 = 2\varepsilon x - \varepsilon_m x^2 + C, \quad (20)$$

где  $C = y^2(0) + \varepsilon_m x^2(0) - 2\varepsilon x(0)$  — постоянная интегрирования.

Очевидно, в рассматриваемом случае  $y(0) = 0$ .

Фазовая траектория представляет собой эллипс

$$y^2 + \varepsilon_m(x - \varepsilon/\varepsilon_m)^2 = \varepsilon_m(x(0) - \varepsilon/\varepsilon_m)^2, \quad (21)$$

изображенный на рис. 1 для случаев  $x(0) = 0$ ;  $\varepsilon/2\varepsilon_m$ ;  $\varepsilon/\varepsilon_m$ . Масштаб по оси  $y$  выбран таким образом, чтобы эллипсы превратились в окружности. Заметим, что эллипс, соответствующий  $x(0) = \varepsilon/\varepsilon_m$ , вырождается в точку, совпадающую с центром фазовых траекторий

$$x_{ц}(0) = \varepsilon/\varepsilon_m, \quad y_{ц} = 0. \quad (22)$$

Это соответствует отсутствию собственных колебаний СД при пуске.

Исключить колебания при пуске СД можно и при нулевых начальных условиях (12). Для этого достаточно начать равноускоренное увеличение угла поворота поля статора не с нуля, а со значения  $\varepsilon/\varepsilon_m$ , т. е. вместо (7) положить

$$\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} + \varepsilon \frac{t^2}{2}. \quad (23)$$

Положение ротора можно зафиксировать при нулевой частоте вращения поля, а затем изменить начальное положение поля статора на угол  $\varepsilon/\varepsilon_m$ . Учитывая невозможность точной реализации генератора тока, питающего статор СД, изменить угол

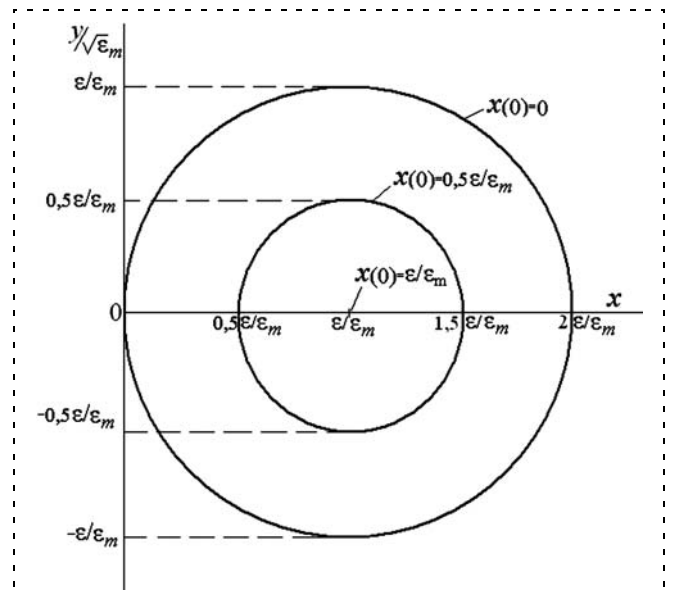


Рис. 1. Фазовые траектории колебаний ротора при равноускоренном частотном пуске СД при  $\varepsilon \ll \varepsilon_m$  и различных начальных положениях ротора

поворота поля статора скачком можно только приближенно.

При достаточно большом значении  $\varepsilon$  разность  $(\xi - \zeta)$  принимает значения, для которых равенство (5) становится слишком приближенным, и линейная модель (6) не позволяет выявить существенные особенности процесса пуска, связанные с возможным выпадением СД из синхронизма. Поэтому необходимо вернуться к уравнению (4).

Решение нелинейного дифференциального уравнения (4) через элементарные функции не выражается, что затрудняет его исследование. Для упрощения задачи рассмотрим фазовые траектории уравнения (4). Они описываются дифференциальным уравнением

$$y \frac{dy}{dx} = \varepsilon - \varepsilon_m \sin x, \quad (24)$$

вытекающим из уравнения (4) с учетом (17) и (18).

Интегрирование уравнения (24) дает

$$y^2 = 2\varepsilon x + 2\varepsilon_m \cos x + C, \quad (25)$$

где постоянная интегрирования  $C$  при  $y(0) = 0$  имеет значение

$$C = -2\varepsilon x(0) - 2\varepsilon_m \cos(x(0)). \quad (26)$$

С учетом (26) выражение (25) принимает вид

$$y^2 = 2\varepsilon(x - x(0)) + 2\varepsilon_m[\cos x - \cos(x(0))]. \quad (27)$$

Рассмотрим вначале нулевые НУ (12), приводящие (27) к виду

$$y^2/\varepsilon_m = 2(\varepsilon/\varepsilon_m)x - 2(1 - \cos x). \quad (28)$$

На рис. 2 в координатах  $x, y^2/\varepsilon_m$  построены смещенная косинусоида  $2(1 - \cos x)$  и две прямые:  $ax$  и  $bx$  ( $a = 2\varepsilon_{\text{пр}}/\varepsilon_m, b = 2\varepsilon/\varepsilon_m, \varepsilon < \varepsilon_{\text{пр}}$ ), первая из которых касается косинусоиды. Поскольку разность косинусоиды и прямой дает интегральную кривую  $y^2/\varepsilon_m$ , очевидно, что ограниченное решение дифференциального уравнения (19) существует при

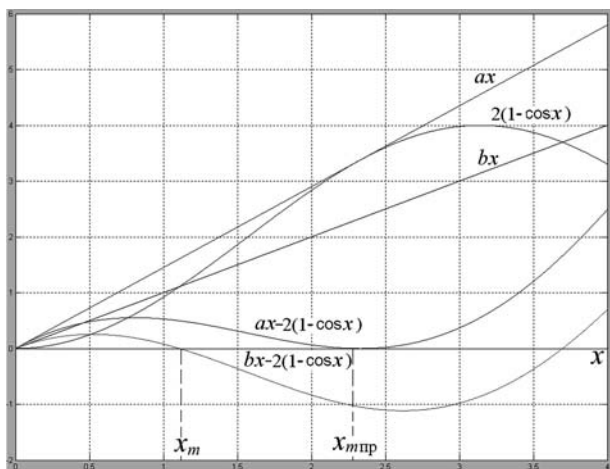


Рис. 2. Определение предельного значения ускорения  $\varepsilon$  при равноускоренном частотном пуске СД и согласованном начальном положении ротора

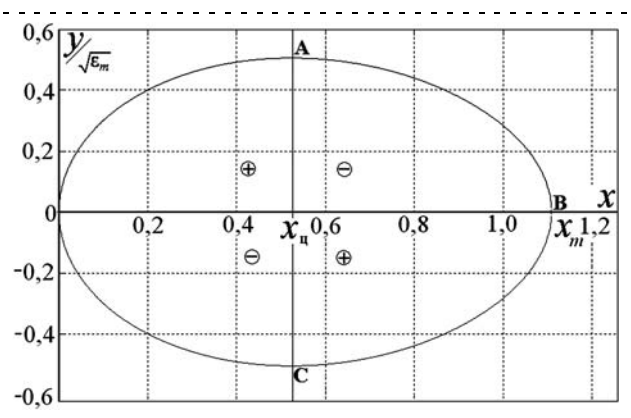


Рис. 3. Фазовая траектория колебаний ротора при равноускоренном частотном пуске СД при  $\varepsilon/\varepsilon_m = 0,5$  и согласованном начальном положении ротора

$0 < \varepsilon < \varepsilon_{\text{пр}}$ . На фазовой плоскости  $(x, y)$  фазовая траектория

$$y = \pm \sqrt{2\varepsilon x - 2\varepsilon_m(1 - \cos x)} \quad (29)$$

представляет собой замкнутую кривую, подобную эллипсу. Действительно, переписав дифференциальное уравнение (19) в виде

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_m \sin x}{y}, \quad (30)$$

легко найти особую точку ( $x_{\text{ц}} = \arcsin(\varepsilon/\varepsilon_m) < \pi/2, y_{\text{ц}} = 0$ ), представляющую собой центр фазовых траекторий. На рис. 3 представлена фазовая траектория системы при  $\varepsilon/\varepsilon_m = 0,5$  в относительных единицах вдоль оси  $y$ , описываемая выражением

$$y/\sqrt{\varepsilon_m} = \pm \sqrt{2[(\varepsilon/\varepsilon_m)x - 1 + \cos x]}.$$

Вертикальная прямая  $x = x_{\text{ц}} = \text{const}$  и ось  $x$  образуют четыре квадранта с чередующимися знаками производной  $dy/dx$ , определенными согласно дифференциальному уравнению (30). Знаки производной в квадрантах выделены кружками.

Легко установить, исследуя (25) на экстремум, что  $y$  принимает максимальное по величине значение при  $x = x_{\text{ц}}$ . В случае  $x(0) = 0$  оно составляет

$$y_m = \pm \sqrt{2\varepsilon x_{\text{ц}} - 2\varepsilon_m(1 - \cos x_{\text{ц}})}. \quad (31)$$

Максимальное значение  $x$  представляет собой наименьший положительный корень уравнения

$$(\varepsilon/\varepsilon_m)x - 1 + \cos x = 0. \quad (32)$$

Решение уравнения (32) при  $\varepsilon/\varepsilon_m = 0,5$  дает значение  $x_m = 1,109$  эл. рад.

Движение изображающей точки по замкнутой фазовой траектории, подобной эллипсу, физически соответствует разгону СД, сопровождающемуся незатухающими колебаниями ротора. При пуске СД (начале вращения поля статора) ротор начинает вращаться, отставая от поля статора. Это отставание, равное  $x$ , и скорость его изменения  $y$  (17) увеличиваются (дуга ОА на рис. 3), пока при  $x = x_{\text{ц}}$

у не примет максимальное значение  $u_m$ . В дальнейшем скорость увеличения отставания начинает уменьшаться, поскольку развиваемое СД ускорение превышает величину  $\varepsilon$ , и скорость ротора растет быстрее скорости поля. Однако отставание ротора продолжает расти (дуга АВ). В момент равенства скоростей поля и ротора рост отставания прекращается. Оно принимает максимальное значение  $x_m$  и начинает уменьшаться, поскольку скорость ротора становится больше скорости вращения поля статора (дуга ВС). В момент уменьшения отставания до значения  $x = x_{ц}$  скорость его уменьшения принимает максимальное значение  $y_m$  ( $y = -y_m$ ) и начинает уменьшаться, поскольку ускорение СД становится меньше  $\varepsilon$ , и скорость ротора растет медленнее скорости поля (дуга С0). В момент следующего равенства скоростей ротора и поля при  $y = 0$ ,  $x = 0$  (точка 0 фазовой траектории) заканчивается первый период колебаний. С этого момента процесс колебаний повторяется, а изображающая точка очередной раз обходит "эллипс" по часовой стрелке.

Очевидно, что разгон СД сопровождается колебаниями его ускорения (вращающего момента) вокруг необходимого значения  $\varepsilon$ . С увеличением  $\varepsilon/\varepsilon_m$  центр фазовых траекторий смещается вправо быстрее, чем растет  $\varepsilon/\varepsilon_m$ , поскольку  $\arcsin(\varepsilon/\varepsilon_m)$  при увеличении  $\varepsilon/\varepsilon_m$  от 0 до 1 растет быстрее своего аргумента. При этом происходит и увеличение амплитуды отставания  $x_m$ . Превышение значением  $x_m$  величины  $\pi/2$  приводит к уменьшению значения ускорения в момент сравнения скоростей ротора и поля статора (точка В фазовой траектории). Пока ускорение СД в этот момент превышает значение  $\varepsilon$ , происходит колебательный разгон, и двигатель не выпадает из синхронизма. В случае предельного значения  $\varepsilon = \varepsilon_{пр}$  в момент равенства скоростей ротора и поля статора ускорение, развиваемое ротором, равно ускорению поля  $\varepsilon$ . Достаточно небольшого смещения точки В вправо вдоль оси  $x$ , чтобы развиваемое ротором ускорение стало при равенстве скоростей меньше  $\varepsilon$ . В этом случае рост скорости двигателя лавинообразно замедляется, и происходит выпадение его из синхронизма. При смещении точки В влево вдоль оси  $x$  ускорение СД становится больше  $\varepsilon$ , и колебательный разгон продолжается.

Для определения  $\varepsilon_{пр}(\varepsilon_{пр}/\varepsilon_m)$  необходимо решить систему уравнений

$$\sin x = \varepsilon_{пр}/\varepsilon_m, (\varepsilon_{пр}/\varepsilon_m)x - 1 + \cos x = 0. \quad (33)$$

Ее решением являются значение  $\varepsilon_{пр}/\varepsilon_m$  и предельное значение максимального отставания  $x_{мпр}$ . Система уравнений следует из условия касания прямой  $2(\varepsilon_{пр}/\varepsilon_m)x$  и кривой  $2(1 - \cos x)$  (см. рис. 2). Систему (33) легко свести к одному уравнению подстановкой первого уравнения во второе, что дает

$$x \sin x - 1 + \cos x = 0. \quad (34)$$

Решая (34), находим  $x_{мпр} = 2,3311$  эл. рад (133,56 эл. град),  $\varepsilon_{пр}/\varepsilon_m = \sin x_{мпр} = 0,7246$ .

Как следует из вышесказанного, можно обеспечить пуск с большим, чем  $\varepsilon_{пр}$ , ускорением, если уменьшить или даже совсем исключить сопровождающие пуск колебания ротора СД. Достичь этого возможно, организовав необходимое начальное отставание ротора от поля статора.

При пуске в случае опережающего положения ротора ( $x(0) < 0$ ) устанавливаются колебания большей амплитуды, чем при ( $x(0) = 0$ ). При достаточно большом начальном опережении частотный пуск с постоянным ускорением  $\varepsilon$  становится невозможным, несмотря даже на выполнение сильного неравенства  $\varepsilon < \varepsilon_{пр}$ . Физическая причина этого заключается в начальном вращении ротора в сторону, противоположную вращению поля. В результате, в момент согласования поле статора и ротор вращаются в противоположные стороны, отставание увеличивается быстрее, чем при нулевых НУ. Равенство скоростей при этом наступает при большем значении  $x_m$  (рис. 3) или вообще не может наступить, как при  $\varepsilon > \varepsilon_{пр}$ .

Математический анализ показывает, что вторая особая точка на фазовой плоскости ( $x = \pi - x_{ц}$ ,  $y = 0$ ), в отличие от первой ( $x = x_{ц}$ ,  $y_{ц} = 0$ ), представляющей собой центр, оказывается "седлом" [2]. Из теории устойчивости известно, что к "седлу" асимптотически приближаются при  $t \rightarrow \infty$  две фазовые траектории, имеющие общую касательную в "седле". Еще две фазовые траектории асимптотически приближаются к "седлу" при  $t \rightarrow -\infty$  и также имеют в "седле" общую касательную. Первую пару фазовых траекторий называют устойчивыми "усами" "седла", а вторую пару — неустойчивыми "усами" "седла" [2]. Ни одна другая фазовая траектория не приближается к "седлу" неограниченно, хотя может проходить сколь угодно близко от "седла".

На рис. 4 представлен фазовый портрет разгона СД в районе начала координат и двух особых точек при  $\varepsilon/\varepsilon_m = 0,5$ . Построение фазового портрета упрощается наличием аналитического описания фазовых траекторий, проходящих через заданную точку

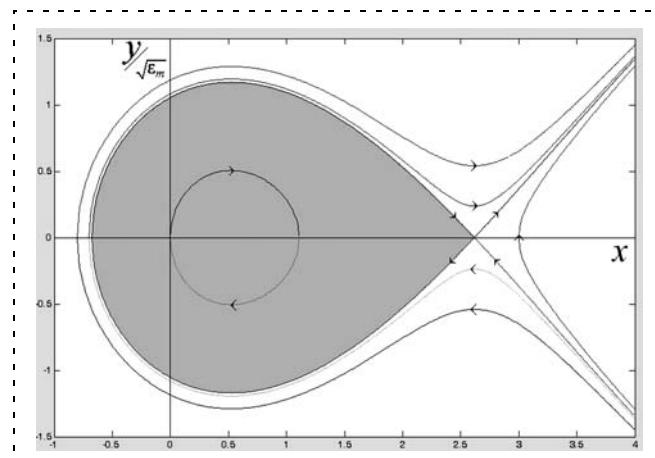


Рис. 4. Фазовый портрет колебаний ротора при равноускоренном частотном пуске СД при  $\varepsilon/\varepsilon_m = 0,5$  в районе начала координат и двух особых точек



фазовой плоскости. Подставляя в выражение интегральной кривой координаты заданной точки фазовой плоскости  $(x_0, y_0)$ , получаем

$$C = y_0^2 - 2\epsilon x_0 - 2\epsilon_m \cos x_0,$$

$$y^2 = y_0^2 + 2\epsilon(x - x_0) + 2\epsilon_m(\cos x - \cos x_0)$$

и уравнение фазовой траектории

$$y = \pm \sqrt{y_0^2 + 2\epsilon(x - x_0) + 2\epsilon_m(\cos x - \cos x_0)}. \quad (35)$$

Очевидно, что "+" в формуле (35) соответствует  $y_0 > 0$ , а "-" соответствует  $y_0 < 0$ . В случае же  $y_0 = 0$  "+" соответствует направлению траекторий вверх, а "-" — направлению ее вниз. Направление же траектории при  $y_0 = 0$  определяется знаком  $dy/dt$ , найти который можно по выражению

$$\frac{dy}{dt} = \epsilon - \epsilon_m \sin x. \quad (36)$$

Анализ фазового портрета (рис. 4) показывает, что колебательный равноускоренный разгон СД с ускорением  $\epsilon < \epsilon_{пр}$  возможен только при НУ, соответствующих точкам, лежащим в области фазовой плоскости, содержащей начало координат  $(x = 0, y = 0)$  и ограниченной устойчивым и неустойчивым "усами", образующими замкнутую кривую, проходящую через "седло"  $(x = \pi - \arcsin(\epsilon/\epsilon_m), y = 0)$ . Любым НУ, представленным внутренней точкой этой области, соответствует замкнутая, подобная эллипсу, фазовая траектория с центром

$$x = x_{ц} = \arcsin(\epsilon/\epsilon_m), y = y_{ц} = 0.$$

При увеличении ускорения  $\epsilon$  сокращается область допустимых НУ. При  $\epsilon_{пр} < \epsilon < \epsilon_m$  эта область уже не содержит начало координат. Ее граница по-прежнему представляет собой замкнутую фазовую траекторию, образованную устойчивым "усом", входящим в "седло", и неустойчивым "усом", исходящим из "седла". Описание границы легко получить, подставив в формулу (35)  $y_0 = 0, x_0 = \pi - x_{ц}, x_{ц} = \arcsin(\epsilon/\epsilon_m)$ , что дает

$$y/\sqrt{\epsilon_m} = \pm \sqrt{2[(\epsilon/\epsilon_m)(x - \pi + x_{ц}) + \cos x + \cos x_{ц}]},$$

$$x_{\min} < x < \pi - x_{ц}, \quad (37)$$

где  $x_{\min}$  — корень нелинейного уравнения

$$(\epsilon/\epsilon_m)x + \cos x - (\epsilon/\epsilon_m)(\pi - x_{ц}) + \cos x_{ц} = 0. \quad (38)$$

На рис. 5 представлена область допустимых начальных условий для  $\epsilon/\epsilon_m = 0,9$ , построенная по выражению (37).

Очевидно, что при  $\epsilon/\epsilon_m \rightarrow 1$  область допустимых НУ представляет собой область, стягивающуюся в точку с координатами  $(x = \pi/2, y = 0)$ .

В случае НУ, не принадлежащих допустимой области, синхронный разгон СД не возможен. В этом случае отставание ротора от поля и скорость его нарастания неограниченно возрастают. Синхрони-

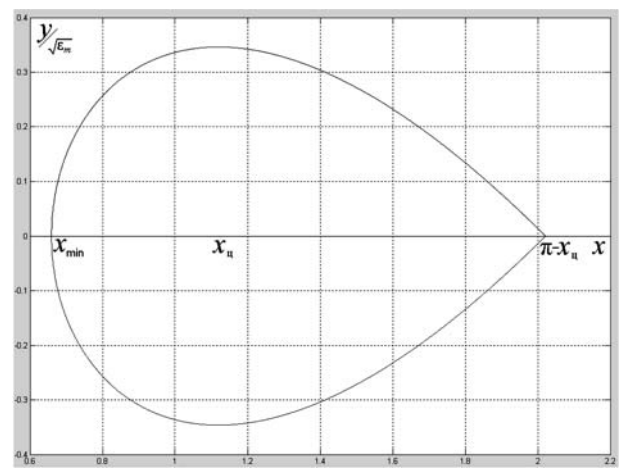


Рис. 5. Область допустимых начальных условий при равноускоренном частотном пуске СД в случае ускорения  $\epsilon = 0,9\epsilon_m > \epsilon_{пр}$

зация при отставании ротора от поля статора на  $2\pi n$  эл. рад. ( $n$  — целое число) произойти не может, поскольку область устойчивости равноускоренного разгона ограничена неустойчивой фазовой траекторией, к которой фазовые траектории не приближаются ни изнутри области устойчивости, ни снаружи. При наличии информации о текущем положении и скорости ротора синхронизацию можно восстановить, установив положение и скорость поля статора такими, чтобы изображающая точка на фазовой плоскости попала в область устойчивости.

В процессе синхронного равноускоренного пуска изображающая точка движется по замкнутой траектории, лежащей внутри области допустимых начальных условий. Если действующие на СД возмущения не выводят изображающую точку из этой области, синхронный равноускоренный пуск продолжается. В противном случае СД выпадает из синхронизма, т. е. отставание ротора от поля и скорость его роста начинают неограниченно возрастать.

#### Пуск СД при постоянном реактивном моменте нагрузки ( $M_H = \text{const}$ )

В этом случае уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{d^2 \zeta}{dt^2} = \epsilon_m \sin(\xi - \zeta) - \epsilon_H, \quad (39)$$

где  $\epsilon_H = pM_H/J$  — ускорение в эл. рад/с<sup>2</sup>, создаваемое моментом нагрузки.

С учетом обозначений (17) уравнение (39) можно записать в аналогичном (24) виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\epsilon_m \sin x + \epsilon_H + \epsilon$$

или  $y \frac{dy}{dx} = -\epsilon_m \sin x + \epsilon_H + \epsilon. \quad (40)$

Интегрирование (40) дает

$$y^2 = 2\varepsilon_m \cos x + 2(\varepsilon + \varepsilon_H)x + C, \quad (41)$$

где постоянная интегрирования  $C$ , определяемая из НУ, имеет значение

$$C = y^2(0) - 2\varepsilon_m \cos x(0) - 2(\varepsilon + \varepsilon_H)x(0). \quad (42)$$

Из выражений (41), (42) получаем уравнение фазовых траекторий

$$y = \pm \sqrt{y^2(0) + 2(\varepsilon + \varepsilon_H)(x - x(0)) + 2\varepsilon_m(\cos x - \cos x(0))}, \quad (43)$$

аналогичное уравнению (35).

Сравнение (35) и (43) показывает, что фазовые траектории пуска СД с ускорением  $\varepsilon$  при постоянном моменте нагрузки совпадают с фазовыми траекториями пуска СД на холостом ходу при ускорении, равном  $\varepsilon + \varepsilon_H$ , и одинаковых НУ.

Следовательно, область допустимых НУ при пуске с ускорением  $\varepsilon$  и постоянном моменте нагрузки соответствует области допустимых НУ при пуске на холостом ходу с ускорением, большим  $\varepsilon$  на величину  $\varepsilon_H$ . Таким образом, при пуске с одинаковым ускорением область допустимых НУ с увеличением реактивного момента нагрузки уменьшается.

Пуск СД как на холостом ходу, так и при постоянной нагрузке сопровождается в общем случае колебаниями ротора, которые можно исключить, обеспечив НУ:  $x(0) = x_{ц} = \arcsin(\varepsilon/\varepsilon_m)$ ,  $y(0) = 0$  на холостом ходу и  $x(0) = x_{ц} = \arcsin((\varepsilon + \varepsilon_H)/\varepsilon_m)$ ,  $y(0) = 0$  при постоянном моменте нагрузки. Однако при окончании разгона (при достижении заданной скорости вращения ротора) и прекращении роста частоты тока статора СД также возникают колебания ротора, вызванные отставанием ротора от поля статора, превышающим отставание, необходимое в установившемся режиме.

Действительно, если в момент окончания разгона рост частоты прекращается скачком, то уравнение фазовых траекторий изменяется. Вместо уравнений

$$x = x_{ц} = \arcsin(\varepsilon/\varepsilon_m), y = 0$$

при разгоне на холостом ходу и

$$x = x_{ц} = \arcsin((\varepsilon + \varepsilon_H)/\varepsilon_m), y = 0$$

при разгоне с постоянным моментом нагрузки получаем согласно (35) и (43) соответственно

$$y = \pm \sqrt{2\varepsilon_m(\cos x - \cos x_{ц})} \quad (44)$$

$$\text{и } y = \pm \sqrt{2\varepsilon_H(x - x_{ц}) + 2\varepsilon_m(\cos x - \cos x_{ц})}. \quad (45)$$

Из выражения (44) очевидно, что колебания ротора при нулевом моменте нагрузки будут происходить вокруг угла поворота поля статора с ампли-

тудой  $x_{ц} = \arcsin(\varepsilon/\varepsilon_m)$ . При  $x = 0$  принимает максимальное по модулю значение

$$y_m = \pm \sqrt{2\varepsilon_m(1 - \cos x_{ц})} = 2\sqrt{\varepsilon_m} \sin(x_{ц}/2). \quad (46)$$

Фазовая траектория в этом случае — симметричная, замкнутая, кривая, подобная эллипсу с центром в начале координат.

В случае постоянного момента нагрузки колебания будут происходить вокруг угла, смещенного относительно угла поворота поля статора на угол  $x'_{ц} = \arcsin(\varepsilon_H/\varepsilon_m)$ . Фазовая траектория — замкнутая, но симметричная только относительно оси  $x$  кривая. Предельные значения  $x$ :  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  — корни уравнения

$$\cos x - \cos x_{ц} + (\varepsilon_H/\varepsilon_m)(x - x_{ц}) = 0, \quad (47)$$

а амплитудное значение  $y$

$$y_m = \sqrt{2\varepsilon_H(x'_{ц} - x_{ц}) + 2\varepsilon_m(\cos x'_{ц} - \cos x_{ц})}, \quad (48)$$

$$x'_{ц} = \arcsin(\varepsilon_H/\varepsilon_m).$$

Если возможно скачкообразное изменение положения поля статора, то колебания при переходе в режим вращения с постоянной скоростью можно исключить. Для этого достаточно в момент достижения заданной скорости вращения ротора и прекращения роста частоты совместить угол поворота поля статора с углом поворота ротора при отсутствии момента нагрузки. При постоянном и отличном от нуля моменте нагрузки достаточно установить поле статора в положение, опережающее ротор на угол  $x'_{ц} = \arcsin(\varepsilon_H/\varepsilon_m)$ .

## Выводы

1. Равноускоренный частотный пуск СД с постоянными магнитами на роторе возможен при сохранении положения точки, изображающей состояние двигателя на фазовой плоскости внутри области устойчивости режима равноускоренного разгона.

2. При пуске СД на холостом ходу на фазовой плоскости, по оси абсцисс которой откладывается отставание ротора от поля статора, область устойчивости ограничена фазовой траекторией, образованной устойчивым и неустойчивым "усами": входящим и исходящим из особой точки — "седла". Внутри области устойчивости находится вторая особая точка — центр фазовых траекторий, соответствующих колебаниям СД, сопровождающим равноускоренный разгон. В процессе разгона область устойчивости не изменяется. Большому ускорению разгона соответствует меньшая область устойчивости.

3. При холостом ходе пуск СД с нулевыми начальными условиями возможен с ускорением, не превышающим 72,46 % от максимального ускорения СД. Пуск при начальном отставании ротора от поля статора на угол, обеспечивающий заданное

ускорение, возможен при большем ускорении, приближающемся к максимальному ускорению СД.

4. В случае разгона с постоянным реактивным моментом нагрузки область устойчивости соответствует области устойчивости при разгоне на холостом ходу, но при ускорении, большем на величину, соответствующую моменту нагрузки. Область устойчивости в процессе разгона не изменяется.

5. При выпадении двигателя из синхронизма для его восстановления необходима информация о текущем положении и скорости ротора.

6. Колебания ротора СД, сопровождающие его равноускоренный разгон и возникающие также

после окончания разгона, можно существенно уменьшить за счет выбора соответствующих начальных условий при пуске и окончании разгона. Исключение колебаний уменьшает вероятность выпадения СД из синхронизма при возмущающих воздействиях.

#### Список литературы

1. Дробкин Б. З., Корзунов Е. А., Крутяков Е. А., Павлов П. А., Пронин М. В. Высоковольтные преобразователи частоты ОАО "Электросила" // Электротехника. 2003. № 5. С. 30–33.
2. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1965.

УДК 681.587.72

**С. Г. Герман-Галкин**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. В. Бормотов**, аспирант,  
БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова  
germangalkin@gmail.com

## Современное состояние и перспективы развития мехатронных систем с вентильными электрическими машинами

*Рассмотрены наиболее перспективные конструкторско-технологические решения при создании вентильных индукторных электрических машин (ВИЭМ), обсуждаются их достоинства и недостатки. Показаны способы построения и применения мехатронных систем (МС) на базе ВИЭМ с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением, с самовозбуждением. Приведены модели МС и результаты их работы.*

**Ключевые слова:** вентильная индукторная электрическая машина, мехатронная система, технология, конструкция, магнитокоммутационная машина, компьютерная модель

### Общие тенденции развития современных мехатронных систем с вентильными электрическими машинами

Основным недостатком традиционных конструкций электрических машин, который на протяжении почти целого века заставляет исследователей искать новые решения, является то обстоятельство, что значительная часть электротехнической стали (сердечников) и проводящих материалов (обмоток) не принимают активного участия в самом процессе электромеханического преобразования энергии и, по сути, выполняют пассивную роль ферромагнитного и электрического проводника для замыкания магнитных потоков и токов.

Начиная с 60-х годов прошлого века, в электромашиностроении для устранения отмеченных недостатков явно преобладает тенденция перехода на

машины, которые наиболее часто называют вентильными индукторными электрическими машинами (ВИЭМ). Эти машины требуют построения специальной мехатронной системы с силовым полупроводниковым преобразователем, датчиком положения ротора и микропроцессорной системой управления. Такие конструкции позволяют статорные обмотки выполнить сосредоточенными и значительно сократить пути замыкания магнитного потока. Следует заметить, что аналогичные конструкции впервые были использованы в шаговых двигателях. В качестве исторического примера на рис. 1 приведена конструкция шагового двигателя, запатентованная в 1920 г. [1].

Конструктивные решения ВИЭМ можно разделить на три основные группы [2]:

- ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением;
- ВИЭМ с самовозбуждением;
- ВИЭМ с электромагнитным возбуждением.

Вентильные индукторные электрические машины с магнитоэлектрическим возбуждением и мехатронные системы на их основе появились в 70-х годах прошлого века [3–6]. Вентильный двигатель [7] является первым представителем ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением.

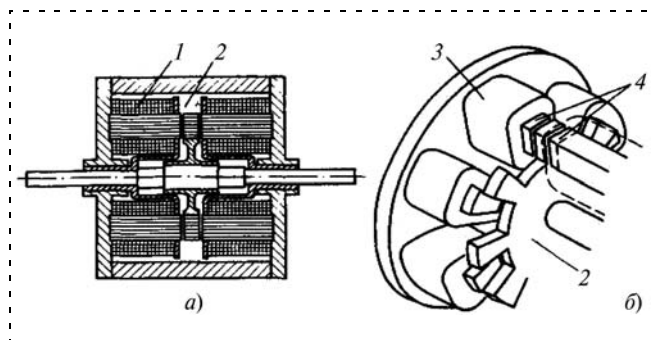


Рис. 1. Конструкция шагового двигателя по [1]

**Конструкторско-технологические решения при создании ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением**

**Преобразование (трансформация) конструкции ВИЭМ**

Как показывают исследования последних лет [8—14], существенное улучшение энергетических характеристик, уменьшение массы и габаритных размеров мехатронных систем с вентильными электрическими машинами на базе ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением достигается за счет рационального формирования путей для магнитных потоков и электрических токов в электрических и магнитных контурах электрических машин. Применение такого подхода подразумевает отказ от традиционных путей конструктивного решения и связано с реформированием устоявшихся взглядов относительно конфигурации машины.

Одним из основных принципов, который можно выделить как современную важную тенденцию в развитии вентильных электрических машин, является принцип преобразования (трансформации) конфигурации, преследующий цель наилучшего (оптимального) использования каждого единичного объема магнитопроводящих и электропроводящих материалов.

Принцип трансформации конфигурации может быть представлен в виде следующего приоритетного ряда: ЦК (цилиндрическая конфигурация) → ДК (однослойная дисковая конфигурация) → МДК (многослойная дисковая конфигурация) → АРДК (аксиально-радиальная дисковая конфигурация).

Каждое последующее преобразование конфигурации ВИЭМ приводит к повышению степени использования электромагнитного ядра, увеличению суммарной площади рабочих зазоров при сохранении объема и сокращению длины линий магнитного поля, создаваемого источниками магнитодвижущих сил. Преобразование цилиндрической конфигурации ВИЭМ в однослойную дисковую показывает рис. 2.

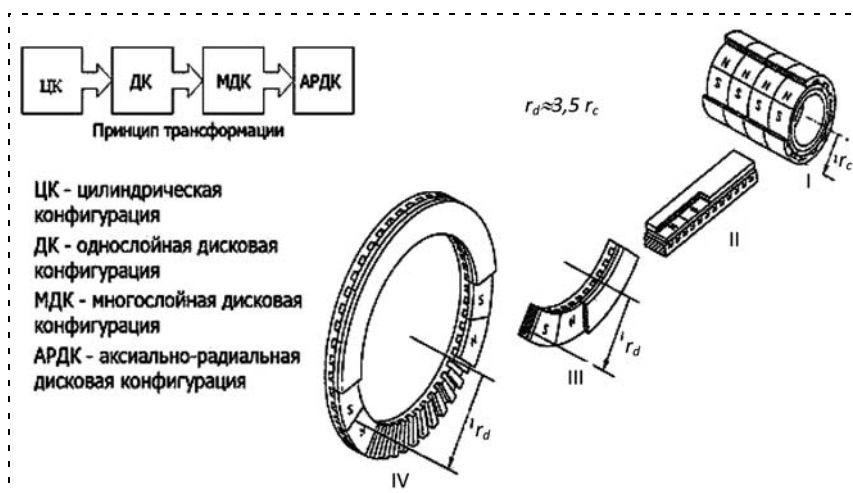


Рис. 2. Преобразование (трансформация) конфигурации ВИЭМ

Электромагнитный момент дискового двигателя возрастает с увеличением радиуса приложения сил и может достигать двукратных и более высоких значений по сравнению с традиционной компоновкой двигателей цилиндрической конфигурации эквивалентного объема.

Преобразование конфигурации явилось эффективным средством создания машин с новыми конструкциями, преимущества которых состоят в следующем [8]:

- разделение активного объема электрической машины на систему аксиально-радиально расположенных токовых и магнитных слоев увеличивает суммарную площадь поверхности взаимодействующих элементов, участвующих в процессе электромеханического преобразования энергии;
- сокращение длины силовых линий магнитного поля в многослойной магнитной системе с аксиальным магнитным потоком повышает коэффициент использования электромагнитного ядра и уменьшает массу расходуемой электротехнической стали, что, в свою очередь, ведет к снижению добавочных потерь на вихревые токи и гистерезис и способствует росту КПД;
- исключение лобовых частей упрощает технологию производства. При этом концентрическая форма обмоток обеспечивает высокий коэффициент заполнения площади пазов проводниками, в особенности при использовании в качестве проводников плоской ленты или фольги;
- устранение из магнитной системы практически всех объемов балластных магнитных материалов, не участвующих непосредственно и процессе электромеханического преобразования энергии, наряду с оптимизацией путей для магнитных потоков приводит к сокращению количества расходуемой электротехнической стали, снижению массы стали и уменьшению общих потерь и нагрева конструкции;
- уменьшение расхода электротехнической стали в промежуточных модулях (не имеющих боковых ярем), магнитные системы которых представляют собой, по сути, только набор ферромагнитных стержней;
- повышение теплоотдачи в проводниках, располагаемых в значительной степени вне пазов.

В таблице приведены сравнительные характеристики двух типов двигателей с радиальным (RFPM) и аксиальным (AFPM) магнитными полями [14].

**Материалы постоянных магнитов**

Наряду с совершенствованием конструкций ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением осуществляется поиск и реализация новых технологий, улучшающих их техни-

Сравнительные характеристики двух типов двигателей с радиальным (RFPM) и аксиальным (AFPM) магнитным полем [14]

Мощность двигателя (кВт)	1,25			2,5		
Тип двигателя с радиальным полем	RFPM-6	RFPM-8	RFPM-12	RFPM-6	RFPM-8	RFPM-12
Число пар полюсов	6	8	12	6	8	12
Масса двигателя (кг)	12,3	11	9,797	22,3	20	17,2
Мощность двигателя (кВт)	1,25			2,5		
Тип двигателя с аксиальным полем	AFPM-11-6	AFPM-11-8	AFPM-11-12	AFPM-21-6	AFPM-21-8	AFPM-21-12
Число пар полюсов	6	8	12	6	8	12
Масса двигателя (кг)	6,71	5,47	4,29	9,8	8,54	7,07

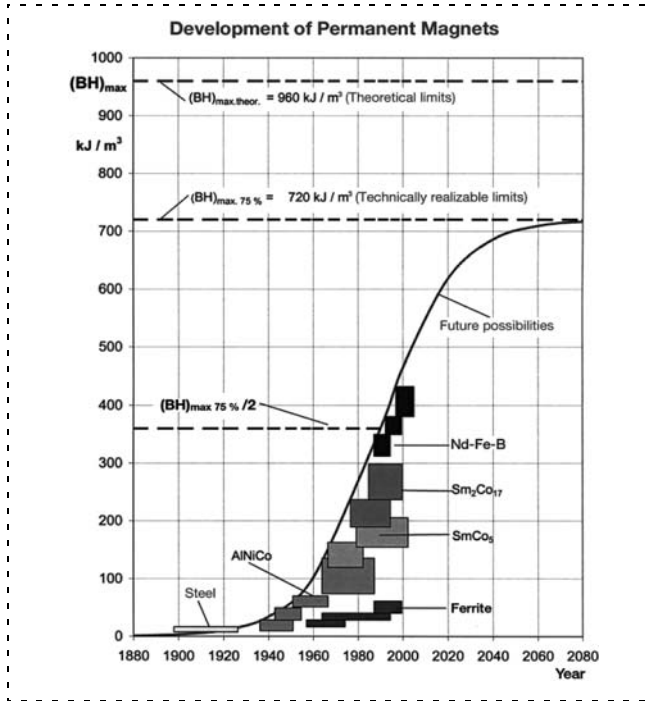


Рис. 3. Историческое развитие постоянных магнитов

ческие характеристики. Эти технологии касаются, прежде всего, новых материалов создания постоянных магнитов из редкоземельных сплавов.

Развитие постоянных магнитов из редкоземельных материалов началось в 60-х гг. со сплава самарий—кобальт (Sm-Co). Свойства материалов  $SmCo_5$  и  $Sm_2Co_{17}$  сделали эти постоянные магниты подходящими для использования в электродвигателях и генераторах, но они были дорогими исключительно из-за наличия кобальта.

В 1983 году был получен высокотехнологичный сплав ниодим—железо—бор (Nd-Fe-B).

В сравнении с Sm-Co Nd-Fe-B значительно дешевле. Основным показателем постоянных магнитов, позволяющим осуществить их сравнение, является удельная энергия. Историческое развитие постоянных магнитов показано на рис. 3 [15].

**Современные конструкции магнитопроводов (технологии HALBAH)**

Одним из перспективных направлений в электромеханике является концепция Клауса Хальбаха [16, 17], используемая в

качестве одного из эффективных средств построения многослойных дисковых машин. Ее идея состоит во введении дополнительных ферромагнитных элементов, приводящих к повышению магнитной индукции в воздушном зазоре ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением.

Это достигается применением специального намагничивания постоянных магнитов в двух близлежащих слоях (рис. 4) с поворотом векторов намагничивания на угол  $\varphi$ , что позволяет отказаться от боковых магнитопроводов и магнитных сердечников, обеспечить малое рассеяние в магнитной системе и добиться удовлетворительных значений индукции магнитного поля в рабочих зазорах беспазовых двигателей (с гладким статором).

Согласно этой концепции для получения в зазоре высоких значений и соответствующей формы кривой распределения индукции магнитного поля, создаваемого МДС постоянных магнитов, не обязательно использовать ферромагнитные ярма для замыкания магнитных потоков. Более важным, в этом и заключается главная особенность концепции намагничивания Хальбаха, является реализация вращения вектора намагниченности согласно определенному закону, изменяющемуся в функции перемещения вдоль полюсного деления. Иными словами, магнитные массивы, обеспечивающие усиление магнитного поля на одной стороне и ослабление его на другой, отличаются от классических тем, что в каждом последующем смежном сегменте векторы намагниченности ориентируются вокруг оси, перпендикулярной к направлению полюсной структуры, устанавливаясь под углом, отличным от угла намагничивания предыдущего сегмента. Обычно угол



Рис. 4. Картина намагничивания постоянных магнитов в двух близлежащих слоях

между векторами поляризации соседних магнитов составляет 90, 60 или же 45°, как показано на рис. 4. Таким образом, в результате исследования магнитных слоев с функциональной зависимостью векторов намагниченности постоянных магнитов доказано, что можно добиться усиления магнитного поля на одной из сторон за счет ослабления его на другой стороне.

Выбор направления вращения векторов намагниченности позволяет формировать системы с заданными свойствами, с сильными и слабыми сторонами намагниченности как в верхней, так и нижней полуплоскостях, а функциональное объединение их позволяет повысить плотность магнитной энергии в зазоре и добиться ослабления интенсивности поля во внешнем пространстве.

Концепция вращения векторов намагниченности постоянных магнитов или векторов МДС электромагнитных систем открывает принципиально новые возможности для проектирования и создания электротехнических устройств и электромеханических систем нового поколения.

#### Мозаичные магнитные системы

Суть новых мозаичных магнитных конструкций заключается во введении дополнительных ферромагнитных элементов, приводящих к повышению

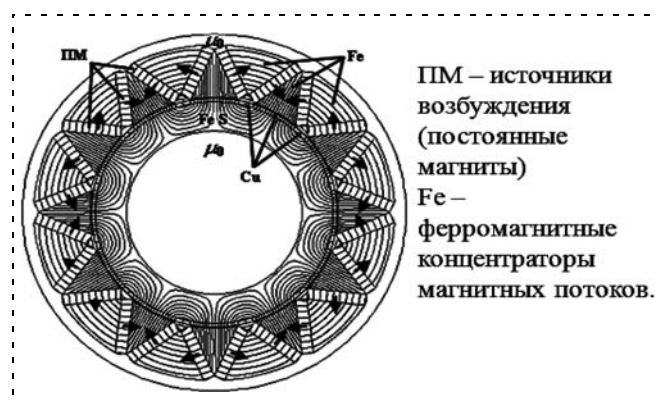


Рис. 5. Мозаичная структура магнитопровода ВИЭМ



Рис. 6. Конструкции обмоток (технология SEMA)

магнитной индукции в воздушном зазоре магнитоэлектрического двигателя. Таким образом, в таких конструкциях осуществляется "развитие" поверхности, на которую устанавливаются источники возбуждения с последующим сужением той площади, которую должен пересекать магнитный поток. Формирование комбинированных магнитных систем на основе плоских сегментов постоянных магнитов и треугольных ферромагнитных концентраторов магнитных потоков приводит к увеличению магнитной индукции в зазоре [18, 19].

На рис. 5 показана радиальная конструкция ВИЭМ с мозаичной структурой магнитопровода.

Применение мозаичных систем позволяет получить не только высокие значения магнитной индукции в зазоре, но и сравнительно большое значение самого рабочего зазора, что позволяет разместить в нем значительное количество меди, а, следовательно, создать условия для повышения линейной токовой нагрузки без увеличения плотности тока в проводниках обмотки.

#### Современные конструкции обмоток (технологии SEMA)

Определенным развитием концепции построения одно- и многослойных электромеханических преобразователей энергии является интенсивно развивающаяся в настоящее время прогрессивная технология SEMA (Segmented ElectroMagnetic Array, рис. 6) [20].

Двигатели на основе архитектуры SEMA по сравнению с традиционными типами аналогичного назначения имеют преимущества по массе, шумам, вибрациям и КПД.

При высоких, средних и низких скоростях вращения они реализуют постоянный вращающий момент. Поэтому такие двигатели удобны для применения в качестве непосредственного привода — без понижающих редукторов и дополнительных механических передач.

При применении предложенного способа размещения обмоток управления электромагнитные силы образуются на большей площади поверхности рабочего зазора по сравнению с традиционными конструкциями. Кроме того, при этом пренебрежимо мало влияние сил, способствующих возникновению колебаний. Обмотки навиты в пазах без применения стальных сердечников, что исключает потери, возникающие из-за явления гистерезиса, а также магнитное воздействие ротора на статор.

#### Мехатронная система на базе ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением

Мехатронная система, построенная на базе трехфазного ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением, представлена на рис. 7. Эта система содержит реверсивный трехфазный автономный инвертор с системой управления (СУ), работа которой синхронизирована с углом поворота двигателя за счет датчика положения ротора (ДПР).

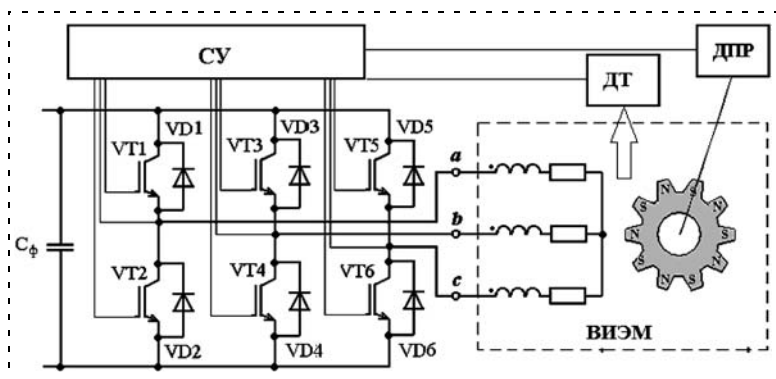


Рис. 7. Мехатронная система с ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением

Для придания мехатронной системе заданных свойств часто используется обратная связь по току исполнительный ВИЭМ от датчиков тока (ДТ).

### Конструкторско-технологические решения при создании ВИЭМ с самовозбуждением

Результаты исследований показывают, что многослойные машины с постоянными магнитами на роторе при использовании перечисленных выше современных конструктивных и технологических решений имеют превосходные массогабаритные показатели и характеризуются рядом достоинств: отсутствием пульсаций электромагнитного момента, высоким КПД, почти в два раза большим удельным моментом и вдвое меньшей массой по сравнению с традиционными цилиндрическими машинами с постоянными магнитами.

Ограничивающими факторами для широкого внедрения таких машин являются высокая цена высокоэнергетических постоянных магнитов, сложная технология их намагничивания, существенная зависимость их характеристик от температуры и радиации и т. д. Снять некоторые из отмеченных ограничений позволяют ВИЭМ с самовозбуждением.

Вентильно-индукторная электрическая машина с самовозбуждением (ВИЭМСВ) относится к классу синхронных реактивных машин с вентильным управлением. В мировой технической литературе ВИЭМСВ обозначается как Switched Reluctance Machine (SRM) и представляет собой совокупность электромеханического преобразователя энергии — индукторной машины — и электронного блока управления (рис. 8).

Необходимыми составляющими блока управления являются:

- блок управления коммутацией, содержащий алгоритм и систему управления электронным коммутатором;
- датчики положения ротора (ДПР) и тока фазы (ДТ);
- *нереверсивный* электронный коммутатор, обеспечивающий однополярное подключение обмоток индукторной машины к источнику питания.

Статор и ротор ВИЭМСВ — зубчатые из шихтованной электротехнической стали. Обмотка статора выполняется в виде сосредоточенных, размещенных на зубцах катушек, что обеспечивает высокую технологичность их изготовления. Ротор не имеет обмотки, что повышает надежность и уменьшает стоимость ВИЭМСВ по сравнению с другими типами вентильного привода.

Из сопоставительного анализа конструкций и режимов работы определены основные отличия ВИЭМ с самовозбуждением [21, 22, 23]:

- наличие двухсторонней явно выраженной зубчатости магнитной системы, позволяющей повысить магнитную несимметрию машины и электромагнитный момент простыми средствами;
- электромагнитный момент носит реактивный характер, основанный на явлении втягивания ферромагнитного сердечника в поле катушки с током;
- способ коммутации обмоток дискретный, при этом алгоритм управления является решающим фактором обеспечения высоких показателей надежности и вольт-амперных характеристик;
- слабая магнитная связь между фазами позволяет рассматривать их работу независимо.

Принципиальным отличием ВИЭМ с самовозбуждением является импульсное питание сосредоточенных по фазам катушек статора в зависимости от положения ротора. Такое управление обеспечивает положительный электромагнитный момент в двигательном режиме и отрицательный — в генераторном. Магнитная независимость фаз двигателя и инвертора позволяет выполнить мехатронную систему с ВИЭМ с самовозбуждением так, что при наличии неисправных обмоток цепи управления блокируют сигналы отпираания силовых полупроводниковых ключей в поврежденной фазе, исключая возбуждение неисправной обмотки. Благодаря такой локализации продолжается рабочий режим ВИЭМСВ, обеспечивая живучесть механизма.

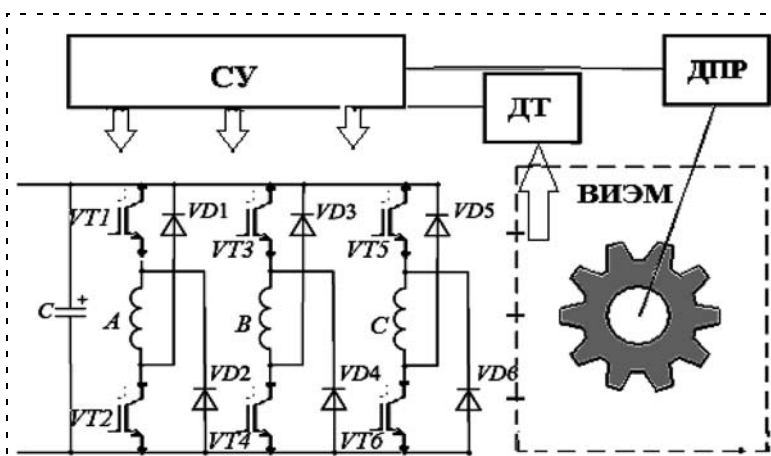


Рис. 8. Мехатронная система с ВИЭМ с самовозбуждением



## Конструкторско-технологические решения при создании ВИЭМ с электромагнитным возбуждением

Рассмотрим особенности конструкции. В конструкциях ВИЭМ с электромагнитным возбуждением (ВИЭМЭВ), как и в ВИЭМ с магнитоэлектрическим возбуждением, реализуется принцип трансформации конфигурации от цилиндрической к аксиально-радиальной [24].

Электромеханическое преобразование энергии в ВИЭМЭВ связано с изменением взаимной индуктивности между обмоткой якоря и обмоткой возбуждения, которое происходит при перемещении ротора относительно статора. Период изменения индукции и потокоцепления при повороте ротора равен одному полюсному делению. Основное преимущество таких машин заключается в возможности реализации весьма малых полюсных делений и, соответственно, большого числа полюсов при малом диаметре ротора.

В зависимости от технических требований возможны разные схемы соединения и коммутации фаз ВИЭМЭВ с контурами внутреннего и внешнего возбуждения. Электромагнитный момент может составлять сумму из активной, индукторной и реактивной составляющих, определяющихся схемами соединения катушек в фазах, которые влияют на качество движения в зависимости от алгоритмов управления.

Дальнейшее развитие конструкций ВИЭМ с электромагнитным возбуждением было предложено проф. А. А. Афоным совместно с учениками [8, 25]. Эти конструкции были названы радиально-осевыми структурами, а сами машины в названных работах получили название машин с коммутацией магнитного потока (МКМ). В МКМ была впервые реализована идея *модульности*, устраняющая основной недостаток ВИЭМ, заключающийся в сложности конструкции статора.

Магнитокоммутационная машина содержит набор элементарных модулей (ЭМ), образующих несколько, в частном случае, показанном на рис. 9, две отдельные МКМ, ЭМ которых смещены в радиальном направлении. Каждая МКМ имеет две неподвижные электромагнитные системы ( $\alpha$  и  $\beta$ ), смещенные на половину полюсного деления (полюсное деление определяется смещением сердечников статора). Вся конструкция содержит П-образные сердечники ( $1_\alpha, 1'_\alpha, 1_\beta, 1'_\beta$ ), обмотки возбуждения ( $3_\alpha, 3'_\alpha, 3_\beta, 3'_\beta$ ) и обмотки якоря ( $4_\alpha, 4'_\alpha, 4_\beta, 4'_\beta$ ). На вращающемся диске ротора расположены части магнитопровода ( $2, 2'$ ), замыкающие магнитный поток. При сохранении одинаковых конструктивных размеров ЭМ внутренняя МКМ содержит меньшее число полюсов. Эта особенность МКМ вызывает необходимость управления каждой машиной от отдельного преобразователя при построении мехатронной системы.

Результаты исследований [8, 25] показывают, что многослойные структуры машин с коммутацией магнитного потока за счет наиболее полного использования всего объема машины и устранения при этом из системы пассивных электрических и магнитных контуров, не участвующих в процессе электромеханического преобразования энергии, позволяют обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей.

В МКМ рационально используются электрические и магнитные материалы, отсутствуют перемагничивание и связанные с ним потери в магнитных контурах вследствие однонаправленных магнитных потоков возбуждения. Сокращение длины силовых линий магнитного поля улучшает использование объема электромагнитного ядра и уменьшает массу расходуемой электротехнической стали, что также ведет к снижению добавочных потерь на вихревые токи и гистерезис и, таким образом, способствует увеличению КПД машины.

Глубина модуляции индуктивности возрастает при периодическом чередовании в структуре подвижного рабочего тела (ротора) ферромагнитных и немагнитных элементов.

Обмотки технологичны, при этом концентрическая форма их обеспечивает высокий коэффициент заполнения площади пазов, в особенности при использовании в качестве проводников плоской ленты или фольги.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований [8, 25] показывают, что многослойные структуры МКМ позволяют обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей. Выполненные оценки показывают, что в предложенных конструкциях можно

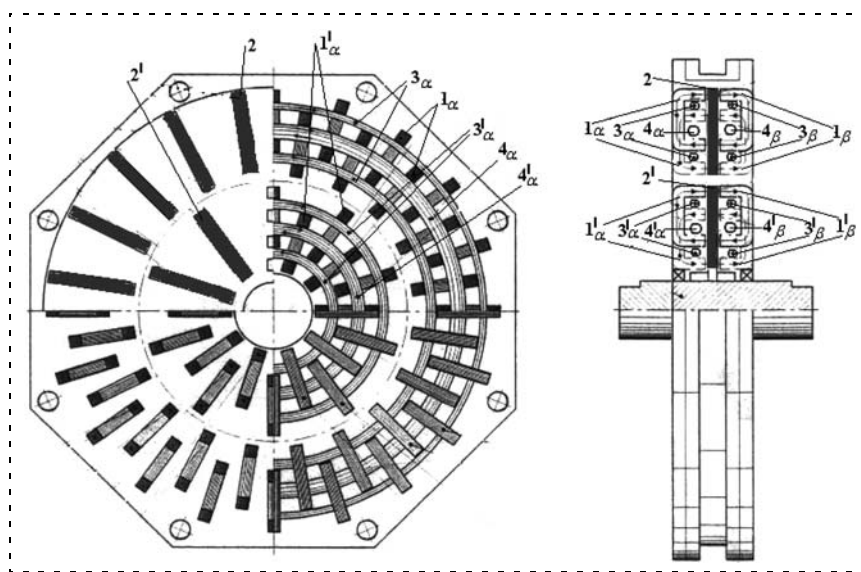


Рис. 9. Конструкция МКМ



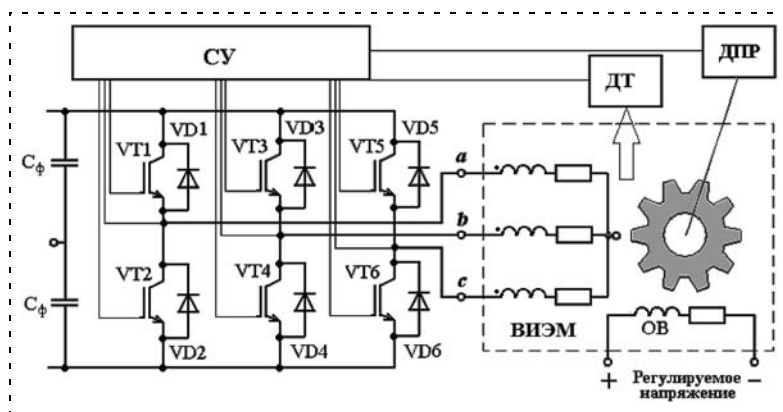


Рис. 10. Мехатронная система на базе ВИЭМ с электромагнитным возбуждением

добиться снижения удельной массы до 0,5 кг/(кВт) при скорости вращения  $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ , что существенно превышает возможности других типов электрических машин.

Функциональная схема мехатронной системы на базе ВИЭМЭВ показана на рис. 10.

Основные достоинства этой системы сводятся к следующему [23]:

- равномерное распределение МДС фазных зон в воздушном зазоре;
- уменьшение амплитуды угловых колебаний ротора;
- снижение амплитуд радиальных сил при согласовании магнитных осей статора и ротора;
- улучшение охлаждения катушек и всего статора;
- большая гибкость соединения катушек фазных обмоток, сокращающих пути контуров магнитного потока и потерь в стали;
- возможность за счет управления исключить или создать магнитную связь фаз;
- схемами соединения фазных обмоток и режима их коммутации можно увеличить пусковой и рабочий моменты, а также сгладить пульсации мгновенных моментов от разных фаз на интервалах их коммутации;
- исключение магнитной связи между фазами повышает надежность работы машины, упрощает математическую модель и алгоритм управления;
- выбором вида возбуждения, формы разнополярного напряжения и МДС (прямоугольной, трапециевидальной или синусоидальной) можно увеличить амплитуду электромагнитного момента, снизить пульсации момента.

Особенности конструкций ВИЭМ с электромагнитным возбуждением и, в частности МКМ, открывают широкие возможности для оптимального проектирования и синтеза требуемых параметров и заданных разработчиком характеристик мехатронного устройства. Наиболее перспективно применение МКМ в транспортных системах, поскольку они позволяют независимо регулировать поток и, тем самым, формировать требуемую тяговую характеристику.

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. М.: Энергоиздат, 1987.

2. Козаченко В. Ф., Обухов Н. А., Анучин А. С., Жарков А. А. Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты "Универсал" // Тр. V-й Междунар. конф. "Электромеханика, электротехнология и электроматериаловедение" МКЭЭ-2003. Ч. 1. Крым. 2003.

3. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока автоматических устройств. М.-Л.: Наука, 1966.

4. Прозоров В. А., Протопопов Л. И., Слесарев А. В. Управляемый бесконтактный двигатель постоянного тока // Сб. ВНИИЭМ "Бесконтактные управляемые электрические двигатели и полупроводниковые устройства". Л., 1974.

5. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979.

6. Беленький Ю. М., Зеленков Г. С., Микеров А. Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. Л.: ЛДНТП, 1987.

7. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (курс лекций). СПб.: Корона — Век, 2006.

8. Afonin A. A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. Szczecin Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, 2000. 241 p.

9. Asko Parviainen. Design of axial-flux permanent magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. Diss. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta, 2005.

10. Gieras J. F., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. New York: Basel: Marcel Dekker, 2002.

11. Qu R., Aydin M., Lipo T. A. Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines // Proc. of IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03, Madison, United States, 1—4 June 2003. V. 3. P. 1948—1954.

12. Huang S., Aydin M., Lipo T. A. Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies // Proc. of IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. V. 3. P. 1619—1625.

13. Deshpande U. S. Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines Review // Proc. of IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03, Madison, United States, 1—4 June 2003. V. 1. P. 509—515.

14. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial-flux versus radial-flux permanent magnet motors, Electromotion, 1996. N 3. P. 134—140.

15. Rare-Earth: Permanent Magnets VACOD, VACOMAX Published by VACUUMSCHMELZE GMBH & Co. KG, Hanau. VACUUMSCHMELZE GMBH & Co. KG 2003.

16. Halbach K. Permanent magnets for production and use of high-energy particle beams // Proc. of the Eighth International Workshop on Rare Earth Cobalt Permanent Magnets and their Applications, Dayton, Ohio, 1985. P. 103.

17. Hull J. R., Turner L. R. Magnetomechanics of Internal-Dipole, Halbach-Array Motor/Generators // IEEE Trans. Magn. 36 (2000). N 4. P. 2004—2011.

18. Afonin A. A. Trends in development of the unconventional electromechanical systems // Proc. 2nd Intern. Conf. on Unconventional and Electromechanical Systems UEES'96, Poland 1996. V. 1. P. 25—36.

19. Афонин А. А. Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов намагниченности постоянных магнитов // Техническая электродинамика. 2004. № 1. С. 47—55.

20. Afonin A. A. Magnetic field of an ironless PM motor // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems UEES'04. Alushta, Ukraine, Sept. 24—29, 2004. P. 225—230. SEMA

21. Ильинский Н. Ф. Перспективы применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях // Электротехника. 1997. № 2. С. 1—3.

22. Голландцев Ю. А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 148 с.

23. Никифоров Б. В. Корабельные системы электродвижения. Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб, 2006.

24. Лебедев Н. И., Гандшу В. М., Явдошак Я. И. Вентильные электрические машины. СПб.-М.: Наука, 1996. С. 352.

25. Afonin A. A., Cierzniewski P. Constructions of multi-layer disc motors for industrial application, Elektryka. 1998. N 92. P. 25—30.

# ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

УДК 621.01 + 621.38

**А. М. Потапов**, д-р тех наук, проф.,  
**М. А. Гушин**, аспирант,  
БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург  
mixxer2083@mail.ru

## О связи показателей качества систем автоматического управления во временной, частотной и корневой областях

*Приведены аналитические взаимосвязи показателей качества систем автоматического управления во временной, частотной и корневой областях в общем случае и для структур типовых нормированных характеристических уравнений с максимальной степенью устойчивости. Даны примеры.*  
**Ключевые слова:** показатели качества, запасы, устойчивость

Одной из ключевых проблем классической и современной теории автоматического управления (ТАУ) является качество процессов управления и регулирования [1, 5, 9]. Особое внимание в работах многих отечественных и зарубежных авторов уделяется поиску взаимосвязи прямых (первичных), временных показателей качества с косвенными: частотными, корневыми и интегральными. Однако, несмотря на более чем 70-летнюю историю данной проблемы, многие вопросы качества до сих пор остаются открытыми.

В данной статье предпринята попытка связать запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также предпоследний гурвицев определитель, во-первых, с коэффициентами и нулями характеристического полинома автоматической системы и, во-вторых, с ее временными, частотными и корневыми показателями качества.

В работе рассматриваются САУ, описываемые передаточной функцией произвольного порядка без нулей и с отрицательной единичной обратной связью.

Тогда передаточная функция разомкнутой системы примет вид:

$$W(p) = \frac{k}{p^n + A_{n-1}p + \dots + A_1p}$$

Введем следующие обозначения для показателей качества переходных процессов системы:

- прямые показатели качества:
  - перерегулирование  $\theta_{\text{ПО}}$ ;
  - время регулирования  $t_{\text{РН}}$ ;
- частотные показатели качества:
  - запас по амплитуде  $\Delta L$ ;
  - запас по фазе  $\Delta\varphi$ ;
- корневые показатели качества:
  - запас устойчивости по усилению  $\gamma$ ;
  - показатель колебательности  $M$ .

Введем такие следующие обозначения:

$A_i$  — коэффициенты характеристического полинома  $n$ -й степени вида

$$p^n + A_{n-1}p^{n-1} + \dots + A_1p + A_0 = 0; \quad (1)$$

$c$  и  $\beta$  — вещественная и мнимая части корней типового нормированного характеристического уравнения (ТНХУ) с максимальной степенью устойчивости (МСУ) [3, 4, 6–8]:

$$x_{i,i+1} = -c_i \pm j\beta_i \text{ и (или) } x_j = -c_j;$$

$$\gamma = \frac{\text{Re}|x_j|}{\text{Im}|x_j|} = \min \frac{|c_j|}{|\beta_j|};$$

$H_{n-1}$  — предпоследний гурвицев определитель, определяемый коэффициентами характеристического полинома (1).

Рассматривается задача анализа зависимостей временных, частотных и корневых показателей качества процессов управления системы:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L = f_1(A_i); \Delta\varphi = f_2(A_i); H_{n-1} = f_3(A_i); \Delta L = f_4(c, \beta); \\ \Delta L = f(H_{n-1}, c, \beta); \gamma = f_6(H_{n-1}); H_{n-1} = f_7(c), \end{aligned} \right\}$$

где  $f_1, \dots, f_7$  — некоторые искомые функциональные зависимости.

### Связь запасов по усилению и фазе с коэффициентами характеристического полинома и полюсами системы

Рассмотрим задачу нахождения аналитических зависимостей, связывающие запасы по амплитуде и фазе, определенные по логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАХ) и по коэффициентам характеристического полинома, например ТНХУ:  $\Delta L = f_1(A_i)$  и  $\Delta\varphi = f_2(A_i)$ .

Как известно, запас устойчивости системы по амплитуде  $\Delta L$  определяется по ЛАХ равенством

$$\Delta L = 20 \lg \Delta A.$$

В то же время из амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы следует, что

$$-1 = -\Delta A - U_p(\bar{\omega}), \quad (2)$$

где  $U_p(\bar{\omega})$  — вещественная часть уравнения (1) для частоты  $\bar{\omega}$ , при которой мнимая составляющая АФЧХ ( $V$ ) обращается в ноль:

$$V_p(\bar{\omega}) = 0. \quad (3)$$

Из выражения (2) можно найти частоту  $\bar{\omega}$ :

$$\bar{\omega} = f(A'_i)$$

и далее вычислить  $\Delta A$ :

$$\Delta A = 1 - U_p(\bar{\omega}).$$

Заметим, что запас устойчивости по амплитуде и фазе определяется по разомкнутым частотным характеристикам (ЛАХ и АФЧХ), а исходной моделью является характеристический полином или передаточная функция замкнутой системы.

Подставляя в (1)  $p = j\omega$  и выделяя вещественные и мнимые части, можно получить зависимости

$$U(\omega) = f_U(A_i, \omega) \text{ и } V(\omega) = f_V(A_i, \omega).$$

Для разомкнутой системы

$$U_p(\omega) = U(\omega) - A_0.$$

В случае ТНХУ имеем:

$$A'_0 = 1,0 \text{ и } U_p(\omega) = U(\omega) - 1. \quad (4)$$

Рассмотрим примеры для систем 4-го и 5-го порядков.

- $n = 4$ .

Зададим следующее ТНХУ:

$$x^4 + A'_3 x^3 + A'_2 x^2 + A'_1 x + A'_0 = 0,$$

где  $A'_1 = 3,2$ ;  $A'_2 = 4,46$ ;  $A'_3 = 3,1$ ;  $A'_0 = 1,0$ .

Здесь прямые показатели качества равны  $\theta_{\text{ПО}} = 1,14 \%$ ;  $t_{\text{рн}} = 5,47$  нс.

Из уравнения (1), выделяя вещественную и мнимую части, с учетом (4) получим:

$$U_p(\omega) = \omega^4 - A'_2 \omega^2; \quad V_p(\omega) = -A'_3 \omega^3 + A'_1 \omega.$$

Из выражения (3) находим

$$\bar{\omega}^2 = \frac{A'_1}{A'_3},$$

следовательно,

$$U_p(\bar{\omega}) = \frac{A'_1{}^2}{A'_3{}^2} - \frac{A'_2 A'_1}{A'_3},$$

или

$$U_p(\bar{\omega}) = -3,534; \quad \Delta A = 4,534 \text{ и } \Delta L = 13,2 \text{ дБ.}$$

- $n = 5$ .

Зададим ТНХУ

$$x^5 + A'_4 x^4 + A'_3 x^3 + A'_2 x^2 + A'_1 x + 1 = 0.$$

Здесь  $A'_4 = 3,09$ ;  $A'_3 = 6,26$ ;  $A'_2 = 6,89$ ;  $A'_1 = 4,07$ ;  $A'_0 = 1,0$ ;  $\Delta L = 10,6$  дБ; прямые показатели качества:  $t_{\text{рн}} = 7,22$  нс;  $\theta_{\text{ПО}} = 0$ ;  $H_4 = 137,7$ .

Выделим вещественную и мнимую части:

$$U_p(\omega) = A'_4 \omega^4 - A'_2 \omega^2; \quad V_p(\omega) = \omega^5 - A'_3 \omega^3 + A'_1 \omega.$$

Находим  $\omega = \bar{\omega}$ , когда  $V(\omega) = 0$ , или

$$\bar{\omega}^4 - A'_3 \bar{\omega}^2 + A'_1 = 0.$$

Отсюда

$$\bar{\omega}^2 = \frac{A'_3}{2} \pm \sqrt{\frac{A'_3{}^2}{4} - A'_1}.$$

Условие  $\bar{\omega} > 0$  дает:

$$A'_3{}^2 \geq 4A'_1.$$

Тогда

$$U(\bar{\omega}) = A'_4 \left( \frac{A'_3}{2} \pm \sqrt{\frac{A'_3{}^2}{4} - A'_1} \right)^2 - A'_2 \left( \frac{A'_3}{2} \pm \sqrt{\frac{A'_3{}^2}{4} - A'_1} \right)$$

и  $U_p(\bar{\omega}) = -3,41$ ;  $\Delta A = 4,41$  и  $\Delta L = 12,8$  дБ.

Обратимся к оценке запаса по фазе.

Очевидно, что

$$\Delta\varphi = 180^\circ + \varphi(\omega_c), \quad (5)$$

где

$$\varphi(\omega_c) = -\arctg \frac{V_p(\omega_c)}{U_p(\omega_c)}. \quad (6)$$

Частоту  $\omega_c$  находим из условия  $|W(j\omega_c)| = 1$  и выражения (4):

$$U_p^2(\omega_c) = 1 - V_p^2(\omega_c).$$

Пусть

$$\left. \begin{aligned} z_1(\omega) &= U_p^2(\omega); \\ z_2(\omega) &= 1 - V_p^2(\omega). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Совместно решая систему уравнений (7), из условия  $z_1(\omega) = z_2(\omega)$  находим  $\omega_c$ . Далее, по зависимостям (6) и (5) определяем величину  $\Delta\varphi$ .

Например, пусть система (7) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} z_1(\omega) &= (-A'_2 \omega^2 + \omega^4)^2; \\ z_2(\omega) &= 1 - (-A'_3 \omega^3 + A'_1 \omega)^2. \end{aligned} \right\}$$

Частоту  $\omega_c$  можно найти различными способами, например, по графикам  $z_1(\omega)$  и  $z_2(\omega)$ . Для рассматриваемого примера

$$z_1(\omega) = (-4,46\omega^2 + \omega^4)^2$$

$$\text{и } z_2(\omega) = 1 - (-3,1\omega^3 + 3,2\omega)^2,$$

откуда находим

$$\omega_c = 0,32 \text{ 1/нс},$$

а из (6) получаем

$$\text{tg}(\omega_c) = 1,12 \text{ или } \varphi_c = -154^\circ \text{ и } \Delta\varphi = 26^\circ.$$

В ряде случаев полезно знать зависимость  $\Delta L$  и  $\Delta\varphi$  от корней характеристического уравнения, т. е. полюсов системы:

$$\Delta L = f_4(c, \beta).$$

Продемонстрируем методику получения данной зависимости на примере системы 4-го порядка.

Пусть корни характеристического уравнения системы равны

$$x_{1,2} = -c \pm j\sqrt{k_1 - c^2} \text{ и } x_{3,4} = -c \pm j\sqrt{k_2 - c^2}, \quad (8)$$

где  $k_1 \neq k_2$ ;  $k_1 = c^2 + \beta_1^2$  и  $k_2 = c^2 + \beta_2^2$ .

Коэффициенты характеристического полинома имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A'_3 &= 4c; \\ A'_2 &= 4c^2 + k_1 + k_2; \\ A'_1 &= 2c(k_1 + k_2); \\ A'_0 &= 1 = k_1 k_2; \end{aligned} \right\} A'_2 = \frac{(A'_3)^2}{4} + 2\frac{A'_1}{A'_3}. \quad (9)$$

В соответствии с уравнениями (4), (8) и (9), имеем:

$$U_p(\bar{\omega}) = -\frac{4c^2(k_1 + k_2) + k_1 k_2}{2}. \quad (10)$$

При  $c = 0,775$ ;  $\beta_1 = 0,4187$ ;  $\beta_2 = 0,83$ ;  $k_1 = 0,775$ ;  $k_2 = 1,29$ , получаем

$$U_p(\bar{\omega}) = -2,978; \Delta A = 3,978 \text{ и } \Delta L = 12 \text{ дБ}.$$

Аналогично формируются зависимости и для расчета запаса по фазе  $\Delta\varphi$ .

В теории управления приняты одинаковые по названию частотный и корневой показатели качества процессов управления — запас устойчивости по модулю /по усилению/ —  $\Delta L$  (в дБ) и  $\gamma$  (в обычных единицах). Данные показатели имеют совершенно разные значения и смысл. Иногда полезно иметь аналитическую зависимость  $\Delta L = f(c, \beta_i, \gamma)$ . Найдем данную зависимость для системы 4-го порядка [2, 4].

Очевидно, что

$$\Delta L = 20\lg[1 - U_p(\bar{\omega})]. \quad (11)$$

В то же время

$$\gamma = \frac{c}{\beta_{\max}} \text{ или } c = \gamma\beta_{\max}. \quad (12)$$

Представим (11) с учетом (12) и (10) в виде

$$\Delta L = 20\lg\left(1 - 2\gamma^2\beta_{\max}^2(k_1 + k_2) + \frac{k_1 k_2}{2}\right).$$

Можно рассчитать:

$$\gamma = 0,9337; 20\lg\gamma = 1,94 \text{ дБ}, \Delta L \cong 12 \text{ дБ}.$$

Полезной может оказаться также следующая приближенная оценка [5]:

$$\Delta L_{\min} = 20\lg\frac{M_i + 1}{M_i}, \quad (13)$$

где  $M_i$  — заданный (принятый) показатель колебательности;  $\Delta L_{\min}$  — минимальный запас устойчивости по амплитуде в дБ при заданном  $M$ .

Очевидно, что  $\Delta L$  реальный должен быть больше  $\Delta L_{\min}$ .

### Предпоследний гурвицев определитель

Известна косвенная оценка запаса устойчивости по предпоследнему гурвицеву определителю ( $H_{n-1}$ ), определяемому коэффициентами характеристического уравнения системы.

Здесь выбор именно предпоследнего гурвицева определителя объясняется тем, что для устойчивости систем необходимо и достаточно, чтобы все диагональные миноры определителя Гурвица были положительны. А так как главный гурвицев определитель является произведением предпоследнего определителя на свободный член, который в ТНХУ равен 1, то выбор предпоследнего определителя очевиден.

Очевидно, чем больше значение  $H_{n-1}$ , тем лучше [2], однако остается открытым вопрос о представлении его через известные показатели качества.

Вычислим

$$\Delta L = f(H_{n-1}, c, \beta_i).$$

Воспользуемся зависимостями (8)—(11) и выражением для  $H_{n-1}$ , обратившись к рассмотренному выше примеру.

Как известно,

$$H_{n-1} = A'_1 A'_2 A'_3 - A'_1 - A'_3.$$

Учитывая (9) и (10), получим

$$H_{n-1} = 4c^2(8c^2 k_1 + 8c^2 k_2 + k_1^2 + k_2^2 + 2k_1 k_2 - 4),$$

или

$$U_p(\bar{\omega}) = -\left[\frac{H_{n-1}(k_1 + k_2)}{2(8c^2 k_1 + 8c^2 k_2 + k_1^2 + k_2^2 + 2k_1 k_2 - 4)} + \frac{k_1 k_2}{2}\right]. \quad (14)$$

Из (13) находим  $H_{n-1} = 24,39$  и, подставляя в (14) значения корней, получим

$$U_p(\bar{\omega}) = -2,977; \Delta A = 3,977 \text{ и } \Delta L = 12 \text{ дБ.}$$

Чаще задаваясь  $\Delta L_{\text{треб}}$ , находим при разных корнях зависимости (14) и требуемые  $H_{n-1}$ .

Заметим, что полезно иметь аналитические зависимости гурвицева определителя от величин  $\gamma$ ,  $\mu$  и  $c$ . Как отмечали Я. З. Цыпкин, А. Г. Ивахненко и другие,  $\eta$  и  $H_{n-1}$  напрямую характеризуют быстродействие системы для колебательных процессов. Покажем, что и числовая оценка  $H_{n-1}$  может быть связана не только с коэффициентами уравнения движения, но и другими более привычными показателями и точными алгебраическими зависимостями.

Так, для ТНХУ 4-го порядка имеем:

$$H_3 = 64c^4; \gamma = \frac{1}{8c} \sqrt{\frac{H_3}{1-c^2}} \text{ при } k_1 = k_2;$$

$$\gamma = \frac{H_3 + (A'_1)^2 + (A'_3)^2}{4A'_1A'_2 \sqrt{\frac{A'_1}{A'_3} - \sqrt{\frac{A'_1{}^2}{A'_3} - 1} - \frac{A'_3}{16}}} \text{ при } k_1 \neq k_2.$$

Очевидно, колебательность  $\mu = \frac{1}{\gamma}$ .  
Для  $n = 5$  при  $k_1 = k_2$ :

$$\gamma = \frac{H_4 + (A'_4A'_1 - 1)^2 - A'_2A'_3 + A'_1(A'_2)^2}{5\sqrt{\sqrt{c^{-1}} - c^2}(A'_3A'_2A'_1 - (A'_3)^2)}.$$

Таким образом, получены простые алгебраические зависимости, которые представляются нам полезными и перспективными ввиду отсутствия ограничения в порядке систем.

#### Список литературы

1. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989.
2. Потапов А. М., Гушин М. А. О связи показателей качества и настройке типовых структур с МСУ // Тр. 10-й Всеросс. НПК. Т. 5. РАН НПО СМ. СПб., 2007.
3. Потапов А. М., Гушин М. А. Анализ устойчивости структур с максимальной степенью устойчивости в нестационарных режимах // Тр. 9-й Всеросс. НПК. Т. 5. Актуальные проблемы защиты и безопасности. Экстремальная робототехника. РАН НПО СМ. СПб., 2006.
4. Потапов А. А., Потапов А. А. Теория и характеристики типовых уравнений с МСУ четвертого порядка // Робототехника и мехатроника. Сб. трудов. РАН. М-СПб., 1996.
5. Теория автоматического управления / Под ред. А. В. Нетушина. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1976.
6. Потапов А. А. Настройка исполнительных приводов на максимальную степень устойчивости // Робототехнические системы комплексной автоматизации ядерной энергетики. Л.: ЛДНТП, 1988.
7. Potapov A., Sherba V., Potapov A. Parametric synthesis and adjustment of dynamic quasioptimal equation having the maximal degree of stability // Proc. of Tenth World Congress of the Theory of Machines and Mechanisms. Vol. 5. Finland, Oulu, 1999. P. 2099–2104.
8. Потапов А. М., Гушин М. А. Частотный анализ и синтез систем управления с максимальной степенью устойчивости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 5.
9. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы / И. М. Макаров, Б. М. Менский. М.: Машиностроение, 1982.

## ИНФОРМАЦИЯ

3–8 октября 2011 г.  
в пос. Дивноморское Геленджикского района состоится

### 4-я Всероссийская мультиконференция ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2011)

*Председатель Президиума мультиконференции* — академик РАН В. Г. Пешехонов

#### Состав мультиконференции

- ♦ Локальная научно-техническая конференция  
"Искусственный интеллект и управление" (ИИУ-2011)  
*Председатель программного комитета конференции* — академик РАН С. Н. Васильев
- ♦ Локальная научно-техническая конференция  
"Мехатроника и эргатические системы" (МЭС-2011)  
*Председатель программного комитета конференции* — член-корреспондент РАН Е. Д. Теряев
- ♦ Локальная научно-техническая конференция  
"Управление в распределенных сетцентрических и мультиагентных системах"  
(УРСИМС-2011)  
*Сопредседатели программного комитета конференции:* член-корреспондент РАН И. А. Каляев  
член-корреспондент РАН Р. М. Юсупов

Подробная информация о мультиконференции и условиях участия в ней размещается на сайте:  
<http://www.mvs.tsure.ru>

**В. И. Кулик**, канд. техн. наук, проф.,  
**А. В. Кулик**, канд. физ-мат. наук, доц.,  
**Ю. В. Загашвили**, д-р техн. наук,  
 первый проректор,  
 БГТУ "Военмех",  
**А. С. Орыщенко**, д-р техн. наук,  
 генеральный директор,  
 ЦНИИ КМ "Прометей"  
 victor.i.kulik@gmail.com

## Моделирование газофазных процессов получения композитов с углеродной и керамической матрицами

*Рассматривается оригинальная математическая модель, позволяющая описывать процессы уплотнения пористых каркасов для различных модификаций процесса газофазного насыщения каркасов (ГНК), и разработанный на базе этой модели программный пакет, моделирующий работу технологической установки ГНК. Программный пакет включает как одномерные модели, необходимые для детального исследования процессов эволюции уплотняемых пористых сред, так и двумерные модели, необходимые для описания сопряженного тепломассообмена во всем объеме технологической установки. Приведены результаты исследования процессов уплотнения пористого каркаса углеродной и карбидокремниевой матрицей методом изотермического ГНК. Задача решается как в одномерной, так и в двумерной постановках.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы с керамической и углеродной матрицей, газофазное насыщение каркасов (ГНК), пористые среды, численное моделирование, тепломассоперенос, управление технологическими процессами

### Введение

Среди современных конструкционных материалов особое место занимают волокнисто-армированные композиционные материалы (КМ) на основе углеродной (углерод-углеродные КМ — УУКМ) и керамической (керамические КМ — ККМ) матриц. Эти материалы обладают уникальным комплексом физико-механических, электромагнитных и теплофизических свойств и позволяют создавать изделия, успешно функционирующие в условиях воздействия высоких температур, агрессивных и радиационных сред. Для производства изделий из УУКМ и ККМ разработаны специальные технологические методы, которые принципиально отличаются от методов производства изделий из традиционных конструкционных материалов.

Одним из наиболее перспективных способов получения УУКМ и ККМ является метод газофазного насыщения каркасов (ГНК), основанный на фильтрации газообразных реагентов (прекурсоров) в глубь нагретого пористого каркаса, их термохимического разложения и осаждения на поверхности пор каркаса матричного материала [1]. Однако внедрение методов ГНК в производство сталкивается с рядом

проблем, а именно: значительное время процесса получения высококачественных КМ; отсутствие достоверной информации о текущей эволюции пористого каркаса, температуре и параметрах газовой среды во всем объеме технологического реактора; сложность решения задачи выбора оптимальных параметров и циклограммы процесса ГНК, обеспечивающих минимальное время насыщения каркаса с требуемыми характеристиками качества КМ.

Экспериментальное исследование и оптимизация технологии ГНК является очень длительной и дорогостоящей процедурой. Поэтому в последние годы для отработки такого типа технологических процессов наиболее целесообразным и экономичным считается подход, основанный на возможностях математического моделирования сложных газофазных процессов, протекающих в объеме технологической установки и пористых реагирующих средах. При этом достоверность результатов исследования определяется тем, в какой степени математическая модель учитывает реальную физическую структуру уплотняемой пористой среды, особенности тепломассопереноса в пористых средах и в объеме реактора, кинетику химических реакций осаждения.

В настоящее время имеется достаточно много публикаций по проблемам моделирования ГНК [2–4]. Вместе с тем, анализ истории развития математического моделирования технологии ГНК показал, что основные усилия специалистов до настоящего времени были сконцентрированы на разработке моделей и исследовании процессов, происходящих только в пористых каркасах без учета переноса во всем объеме реактора. При моделировании ГНК в данной работе учтены основные физико-химические процессы и явления, существенные для технологии ГНК. На базе разработанной модели создан программный пакет, моделирующий работу технологической установки ГНК. Разработанный пакет включает как одномерные модели, необходимые для детального исследования процессов эволюции уплотняемых пористых сред, так и двумерные модели, необходимые для описания сопряженного тепломассообмена во всем объеме технологической установки, содержащей газовую область, через которую прокачиваются газовые реагенты, пористую среду каркаса и твердые части реактора.

### Математическая модель

Характер уплотнения волокнистого каркаса матрицей определяется процессами тепломассопереноса в пористой среде каркаса и в газовой области реактора. Так как скорости химических реакций определяются, прежде всего, уровнем и распределением температуры в объеме реактора, а тепловое поле в реакторе заранее не известно, то следует рассматривать задачу расчета распределения температуры во всем тепловом узле реактора. В данной работе задача сопряженного теплообмена в реакторе решается с учетом переноса тепла за счет

теплопроводности, конвекции и радиации. Таким образом, математическая модель процесса ГНК включает уравнения течения многокомпонентной газовой смеси с учетом протекания гетерогенных химических реакций и уравнения сопряженного теплообмена в системе со сложной геометрией. Так как характерные времена массопереноса в газовой фазе много меньше характерного времени осаждения твердой фазы, то для описания эволюции пор используется квазистационарный подход.

Течение газовой смеси в пористой среде волокнистого каркаса описывается с помощью модели фильтрации Дарси—Бринкмана—Форхаймера [5]. Для моделирования течения в газовой области реактора используются уравнения Навье—Стокса в приближении гипозвукового течения [6]. Обе системы уравнений, описывающие течение в пористой среде и в газе, могут быть объединены в одну систему:

$$\nabla(\rho V) = BR^S; \quad (1)$$

$$\nabla(\rho VC_i + J_i) = R_i + BR_i^S, \quad i = 1, \dots, N_s; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \nabla \left( \frac{1}{\varepsilon} \rho V V \right) = -\nabla p + (\rho - \rho_0)gj + \nabla \tau - B \left( \frac{\mu}{K} V + \frac{\rho C_F}{\sqrt{K}} |V|V \right); \quad (3)$$

$$\nabla(\rho Vh + q) = 0; \quad (4)$$

$$p^{(0)} = \rho RT \frac{1}{M}, \quad (5)$$

где  $B$  — это функция вида

$$B = \begin{cases} 0 & \text{для газовой области;} \\ 1 & \text{для пористой среды,} \end{cases}$$

а пористость  $\varepsilon$ , т. е. объемная доля газа, выбирается исходя из следующего правила:

$$\varepsilon = 1 \quad \text{для газовой области;} \\ 0 < \varepsilon < 1 \quad \text{для пористой среды.}$$

Здесь  $\rho$  — плотность газовой смеси;  $V$  — скорость течения;  $C_i$  — массовая концентрация  $i$ -го компонента смеси;  $J_i$  — вектор плотности массового диффузионного потока  $i$ -го компонента;  $N_s$  — число компонентов в смеси;  $p$  — динамическое давление;  $\rho_0$  — характерная для данной задачи плотность смеси;  $g$  — ускорение свободного падения;  $j$  — единичный вектор, задающий направление действия гравитационной силы;  $\tau$  — тензор вязких напряжений;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости газовой смеси;  $K$  — коэффициент проницаемости пористой среды, вычисляемый по формуле Козени—Кармана [7];  $C_F$  — коэффициент инерции, вычисляемый по формуле Эргуна [8];  $h$  — удельная энтальпия смеси;  $q$  — вектор плотности теплового потока;  $p^{(0)}$  — статическое давление в реакторе;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура;  $M$  — молярная масса смеси;  $R_i$  — массовая скорость образования/исчезновения  $i$ -го компо-

нента смеси в результате гомогенных химических реакций;  $R_i^S$  — массовая скорость образования/исчезновения  $i$ -го компонента смеси в результате гетерогенных химических реакций осаждения матричного материала, протекающих на поверхностях волокон;  $R^S$  — скорость исчезновения массы из газовой фазы за счет гетерогенных реакций.

Массовая скорость образования (исчезновения)  $i$ -го компонента в результате гомогенных химических реакций вычисляется по формуле

$$R_i = M_i \sum_{r=1}^{N_r} (v_{ir}^- - v_{ir}^+) \times \left[ k_r^+ \prod_{j=1}^{N_s} \left( \frac{\rho C_j}{M_j} \right)^{v_{jr}^+} - k_r^- \prod_{j=1}^{N_s} \left( \frac{\rho C_j}{M_j} \right)^{v_{jr}^-} \right],$$

где  $M_i$  — молярная масса  $i$ -го компонента;  $N_r$  — число гомогенных реакций;  $v_{ir}^+$  и  $v_{ir}^-$  — стехиометрические коэффициенты  $i$ -го компонента в  $r$ -й реакции, индексы "+" и "-" относятся к исходным веществам и продуктам реакции соответственно;  $k_r^+$  и  $k_r^-$  — константы скоростей прямой и обратной реакций, которые определяются по закону Аррениуса  $k_r = K_r T^{b_r} \exp(-E_r/RT)$ .

Величины  $R_i^S$  и  $R^S$  вычисляются следующим образом:

$$R_i^S = F_i s_{sg}; \quad R^S = \sum_{i=1}^{N_s} R_i^S,$$

где  $s_{sg}$  — удельная поверхность пор, определяемая как площадь поверхности пор в единице объема пористой среды, а  $F_i$  — массовый поток  $i$ -го компонента из газовой фазы на единицу площади поверхности пор. Значение потоков  $F_i$  находится как результат решения задачи о гетерогенном химическом взаимодействии газовой смеси в поровом пространстве с поверхностью волокон.

Диффузионный поток  $i$ -го компонента вычисляется по формуле

$$J_i = -\rho D_i \left( \nabla C_i + \frac{M_i}{M} k_i^T \frac{\nabla T}{T} \right), \\ D_i = \begin{cases} D_{m,i} & \text{для газовой области;} \\ D_{\text{eff},i} & \text{для пористой среды.} \end{cases}$$

Здесь  $D_{m,i}$ ,  $D_{\text{eff},i}$  — молекулярный и эффективный коэффициенты диффузии  $i$ -го компонента газовой смеси;  $k_i^T$  — термодиффузионное отношение  $i$ -го компонента. Для расчета  $D_{m,i}$  используется формула Уилки [6], а  $D_{\text{eff},i}$  определяется по формуле

$$D_{\text{eff},i} = \frac{\varepsilon}{\theta} \left( \frac{1}{D_{m,i}} + \frac{1}{D_{K,i}} \right)^{-1},$$

где  $\theta$  — коэффициент извилистости пор;  $D_{K,i}$  — коэффициент диффузии Кнудсена  $i$ -го компонента, рассчитываемый по формуле  $D_{K,i} = (2r/3) \sqrt{8RT/\pi M_i}$ , где  $r$  — средний радиус пор [7].

Вектор плотности теплового потока описывается выражением

$$q = -\lambda \nabla T + \sum_{i=1}^{N_s} h_i J_i,$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_m & \text{для газовой области;} \\ \lambda_{\text{eff}} & \text{для пористой среды,} \end{cases}$$

где  $\lambda_m$  — это молекулярная теплопроводность газовой смеси;  $\lambda_{\text{eff}}$  — эффективная теплопроводность пористой среды, учитывающая перенос энергии за счет теплопроводности через обе (газовую и твердую) фазы и радиационный теплообмен через поровое пространство. Для расчета коэффициентов вязкости  $\mu$  и теплопроводности  $\lambda_m$  газовой смеси используются аппроксимации Уилки и Мэйсона—Саксены, соответственно [6].

Модель теплообмена во всей ростовой системе включает в себя помимо уравнения энергии (4), входящего в общую систему уравнений, описывающую течение многокомпонентной газовой смеси, еще уравнение переноса тепла в твердых частях реактора и модель радиационного теплообмена между твердыми телами через газовые зазоры.

Распределение температуры внутри твердых частей реактора удовлетворяет уравнению теплопроводности

$$\nabla(-\lambda_s \nabla T) = Q, \quad (6)$$

где  $\lambda_s$  — теплопроводность твердого материала;  $Q$  — мощность тепловыделения в единице объема за счет резистивного нагрева системы.

Учет радиационного теплообмена осуществляется в рамках предположений о том, что излучение поверхности является серым, отражение от поверхности — диффузным, а твердые тела — непрозрачными. Рассеянием и поглощением излучения в газе пренебрегается. Все поверхности внутри реактора разбиваются на некоторое число элементов, достаточно малых для того, чтобы температура могла считаться равномерной по площади каждого элемента. Вычисление полного лучистого теплового потока, приходящего на элементарный участок поверхности, требует знания конфигурационных множителей [9]. Конфигурационные множители показывают долю энергии, излучаемую одним элементом поверхности и достигающую другого элемента поверхности. Полный радиационный поток, приходящий на элемент поверхности  $k$  ( $k = 1, \dots, N$ , где  $N$  — число элементов на поверхности), вычисляется следующим образом:

$$q_k^{\text{in}} = \sum_{j=1}^{J=N} F_{kj} q_j^{\text{out}},$$

где  $q^{\text{in}}$  и  $q^{\text{out}}$  — радиационные потоки, падающие на элемент поверхности и излучаемые с соответствующего элемента;  $F_{kj}$  — конфигурационные множители. Поток эффективного излучения с элемента поверхности складывается из собственного, вычисляемого с помощью закона Стефана—Больцмана, и отраженного излучений:

$$q_k^{\text{out}} = \sigma \varepsilon_e T_k^4 + (1 - \varepsilon_e) q_k^{\text{in}},$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$  — константа Стефана—Больцмана;  $\varepsilon_e$  — степень черноты излучающей поверхности.

Определяющие уравнения (1)—(6) дискретизируются с помощью метода конечных объемов на неструктурированных вычислительных сетках. Для нахождения поля течения используется метод SIMPLEC. Более подробно численный метод решения задачи описан в работе [10].

Данная математическая модель и метод ее численного решения были положены в основу пакета программ, позволяющего проводить исследование различных модификаций (изотермического, термоградиентного, с вынужденной конвекцией) процессов ГНК. Ключевой особенностью программного пакета является то, что пользователь, задавая режим технологического процесса, работает с ним как с реальной установкой для ГНК.

### Результаты численного исследования и их обсуждение

В данном исследовании разработанный пакет программ был использован для анализа процесса уплотнения пористого каркаса методом изотермического ГНК (ИГНК), являющегося наиболее распространенной модификацией ГНК, при котором считается, что каркас в реакторе находится при постоянной температуре. Исследования проводились в два этапа. На первом этапе рассматривалась одномерная задача массопереноса только в пористой среде волокнистого каркаса. На втором — решалась задача анализа течения и тепломассопереноса во всем объеме реактора (в волокнистом каркасе, в газовой области и в твердых частях реактора) в двумерной осесимметричной постановке.

#### ♦ Исследование процессов уплотнения волокнистого каркаса в одномерной постановке

Известно, что реальные армирующие структуры могут включать несколько систем пор, имеющих значительное отличие в поперечных размерах. В данной работе рассматривали волокнистый каркас, представляющий собой пространственную структуру, армированную прямолинейными пучками волокон в  $n$  направлениях. Такой каркас включает системы пор различного масштаба — между волокнами внутри пучков и между пучками. Масштаб пор может меняться от единиц микрометров между волокнами до сотен микрометров между пучками. Для численного исследования эволюции такой



многонаправленной сложнопористой среды в процессе ИГНК использован одномерный (вдоль толщины каркаса) вариант приведенной выше общей математической модели (при  $B = 1$ ) [4]. Модель учитывает конвективный массоперенос, возникающий в результате фазовых переходов, и описывает уплотнение каркаса как процесс совместного насыщения разномасштабных систем пор с учетом массообмена между ними.

В качестве примера при численном исследовании ИГНК рассматривали каркас однонаправленной структуры, образованный укладкой пучков волокон параллельно поверхности каркаса. Матрица — углеродная. В качестве прекурсора для получения углеродной матрицы был принят метан ( $\text{CH}_4$ ).

Кинетическая схема пиролиза метана была представлена эквивалентной гетерогенной реакцией осаждения пироуглерода:  $\text{CH}_4(\text{g}) \xrightarrow{\text{H}_2} \text{C}(\text{s}) + 2\text{H}_2(\text{g})$ .

Численные исследования процессов ИГНК, проводимых по традиционной схеме в одну стадию, показали, что уплотнение разномасштабных систем пор каркаса происходит по-разному, и это связано, прежде всего, с существенным различием в удельных поверхностях внутрипучковых и межпучковых пор, приводящим к изменению характера массообмена в порах. Было установлено, что температура процесса оказывает наиболее сильное влияние на характер и время процесса уплотнения пор (рис. 1). Из рис. 1 видно, что время процесса уплотнения разномасштабных систем пор отличается почти на два порядка, причем для межпучковых пор суммарная остаточная пористость практически минимальна до температуры процесса порядка  $T = 1350$  К, тогда как для внутрипучковых пор остаточная пористость резко возрастает при температуре больше 1200 К. Это позволяет сделать вывод о необходимости оптимизации процесса, в частности, о проведении процесса ИГНК в две стадии, которые должны быть оптимальными для уплотнения каждой системы пор.

В качестве основного изменяемого технологического параметра при переходе с первого режима на второй была выбрана температура процесса. Для более полного и однородного уплотнения внутрипучковых пор процесс необходимо проводить при более низких температурах, тогда как достижение качественного уплотнения в межпучковых порах возможно при более высоких температурах. Переключение режимов осуществлялось в момент полного прекращения процессов насыщения внутрипучковых пор вследствие закрытия пор по наружной поверхности пучков.

Было исследовано влияние толщины каркаса и температуры одно- и двухстадийного процесса на

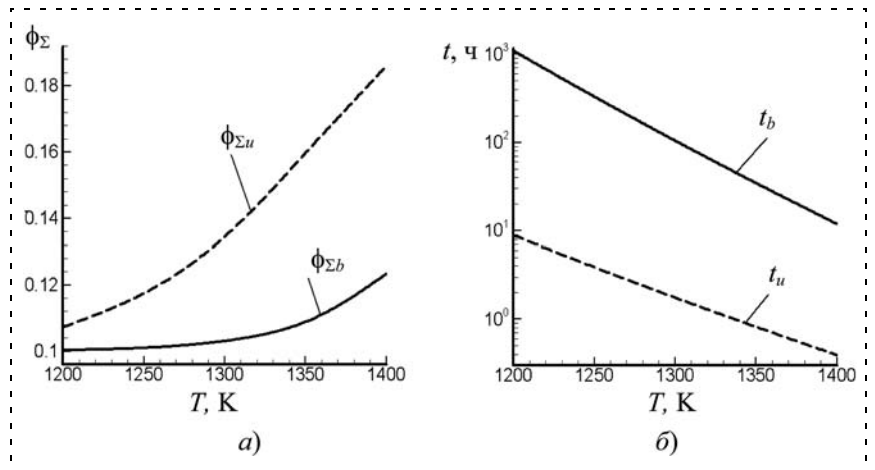


Рис. 1. Влияние температуры каркаса ( $T$ ) на остаточные значения суммарной пористости внутри пучков ( $\phi_{\Sigma u}$ ) и в межпучковых порах ( $\phi_{\Sigma b}$ ) (а) и на время насыщения внутрипучковых ( $t_u$ ) и межпучковых ( $t_b$ ) пор (б). Толщина каркаса — 5 мм

его продолжительность, средние значения остаточной пористости и однородность ее распределения по толщине каркаса как во всем материале, так и в различных системах пор. В качестве примера на рис. 2 представлены зависимости суммарной остаточной пористости в композите и времени процесса от стадийности и температуры процесса (для двухстадийного — на второй стадии). Температура на первой стадии двухстадийного процесса для всех вариантов расчета составляла величину  $T = 1200$  К. Видно, что при двухстадийном процессе достигается значительно более низкий уровень суммарной остаточной пористости композита, причем эффективность двухстадийного процесса по сравнению с одностадийным повышается с увеличением температуры. Кроме того, двухстадийный процесс позволяет получить значительно более однородное

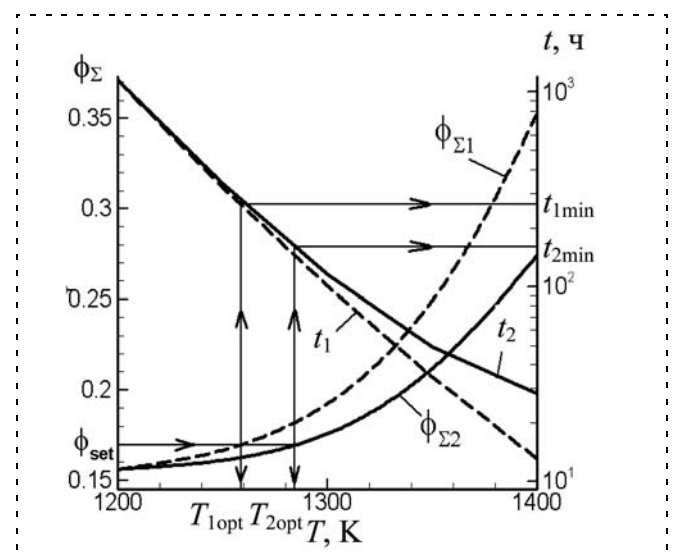


Рис. 2. Зависимости остаточной пористости в композите и времени процесса от стадийности и температуры процесса (для двухстадийного — на второй стадии) для каркасов толщиной 15 мм: --- — одна стадия; — — две стадии

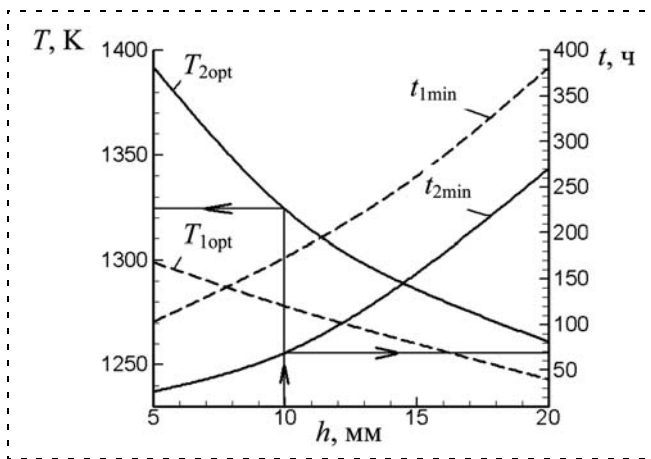


Рис. 3. Зависимости минимального времени ( $t_{\min}$ ) и оптимальных температур одностадийного ( $T_{1\text{opt}}$ ) и двухстадийного ( $T_{2\text{opt}}$  — температура на второй стадии) процессов от толщины каркаса для заданной остаточной пористости  $\varphi_{\text{set}} = 0,17$

распределение остаточной пористости по толщине каркаса в обеих системах пор.

На рис. 2 приведен пример использования полученных результатов для определения оптимальных температурно-временных режимов одно- и двухстадийного процессов, обеспечивающих достижение заданной остаточной пористости ( $\varphi_{\text{set}}$ ) КМ. Видно, что для обеспечения требуемой пористости при двухстадийном ИГНК процесс на второй стадии проводится при более высокой температуре, что приводит, в конечном счете, к уменьшению суммарной продолжительности насыщения каркаса по сравнению с одностадийным процессом. Обобщенные результаты полученных зависимостей применительно к заданной остаточной пористости  $\varphi_{\text{set}} = 0,17$  для всего диапазона исследованных тол-

щин каркаса приведены на рис. 3. Видно, что переход на двухстадийный процесс позволяет значительно сократить (в 1,4...3,9 раза) время процесса за счет проведения процесса на второй стадии при более высокой температуре.

♦ **Исследование процессов уплотнения и теплопереноса в технологической установке в двумерной постановке**

Двумерная версия разработанного пакета программ была использована для анализа процесса ИГНК получения композиционного материала с SiC-матрицей из метилтрихлорсилана (МТС)  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$ . Кинетическая схема пиролиза МТС была представлена в виде обратимой гетерогенной реакции:  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3(\text{g}) \xrightarrow{\text{H}_2} \text{SiC}(\text{s}) + 3\text{HCl}(\text{g})$ . Таким образом, газовая смесь состоит из трех компонентов:  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{HCl}$ .

Общая схема модельного реактора, использованная для численного исследования, представлена на рис. 4. Цилиндрический каркас с толщиной стенки 1 см располагается на оправке в центре реактора. Наружный диаметр каркаса равен 12 см, а его высота — 40 см. Каркас представляет собой 3D-структуру, образованную тремя ортогонально уложенными системами цилиндрических стержней. Пористая среда каркаса и ее эволюция в процессе уплотнения описывается моделью, полученной на основании характеристик геометрических образов многонаправленных структур [11].

На рис. 5 представлено распределение температуры в объеме реактора. Видно, что каркас не является идеально изотермическим — изменение температуры по высоте каркаса составляет порядка 50 К, что довольно много для технологии ИГНК.

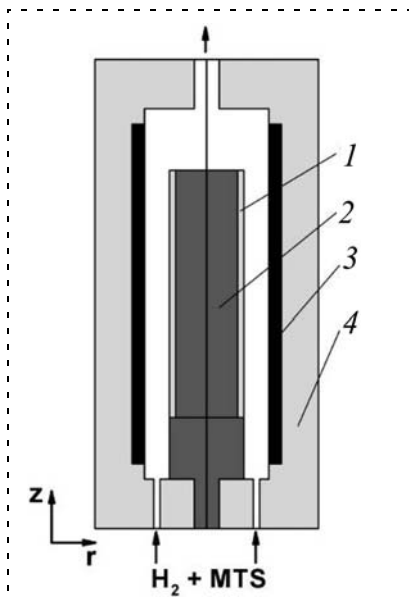


Рис. 4. Схема реактора для ИГНК: 1 — каркас; 2 — формообразующая оснастка; 3 — нагреватель; 4 — теплоизоляция

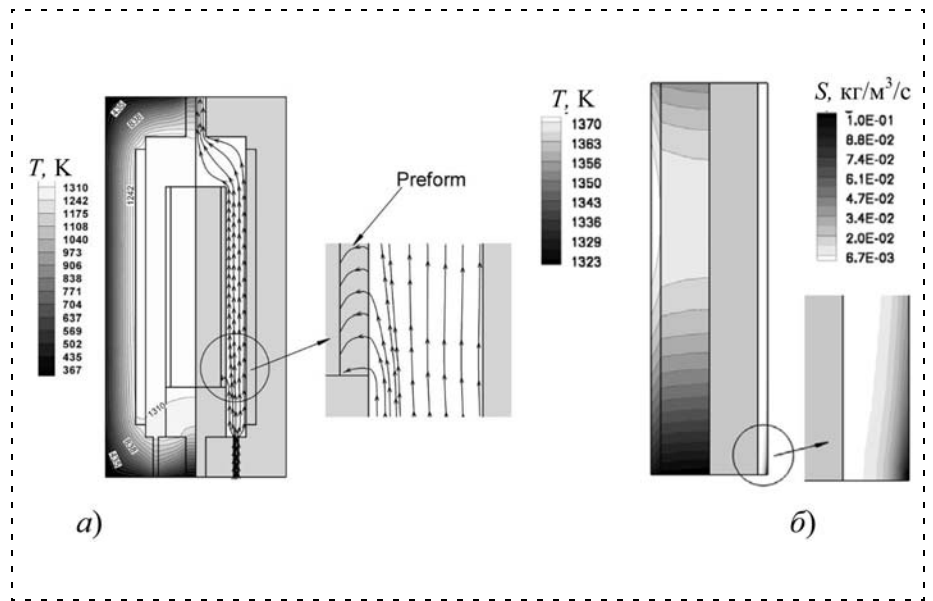


Рис. 5. Распределение температуры во всем объеме реактора и схема течения в реакторе в начальный момент (на вставке более подробно показано совместное течение в газовой области и каркасе) (а); распределение температуры в объеме каркаса и формообразующей оснастки, а также профиль скорости осаждения ( $S$ ) SiC в объеме каркаса (б)

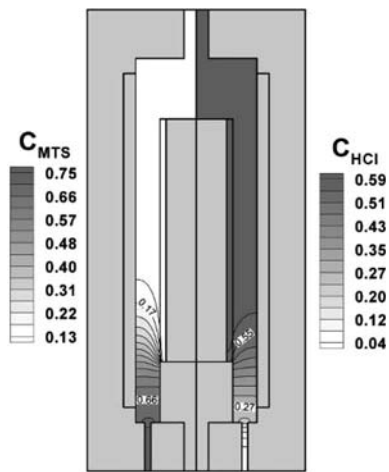


Рис. 6. Распределение массовых концентраций МТС (слева) и НСІ (справа) в газовой области реактора и каркасе

Перепад температуры по толщине каркаса при рассматриваемых условиях незначителен и не превышает 3...4 К.

Картина течения в газовой области реактора и каркасе в начальный момент уплотнения приведена на рис. 5. Видно, что процесс осаждения матрицы в объеме каркаса существенным образом влияет на общее течение газовой смеси. Исчезновение массы из газа за счет фазовых переходов, сопровождающих образование матрицы, приводит к снижению давления в порах, вследствие чего газ течет через пористую среду. Таким образом, МТС переносится в каркасе как с помощью механизма диффузии, так и конвекции, что хорошо видно из рис. 5 по линиям тока, направленным в глубь пористой среды.

На рис. 6 показано распределение массовых концентраций МТС и НСІ в газовой области реактора и каркасе в начальный момент процесса. Видно, что содержание МТС в смеси заметно снижается по мере течения газа вдоль каркаса. Это происходит в результате расхода МТС на формирование SiC-матрицы. При разложении МТС на поверхностях армирующих стержней происходит образование НСІ, концентрация которого возрастает по высоте каркаса вследствие его накопления в газовой смеси.

Неравномерность полей температуры и, в первую очередь, концентраций приводит к существенно неоднородному распределению скорости осаждения матричного материала. На рис. 5 представлен профиль скорости осаждения SiC в объеме каркаса в начальный момент процесса. Видно, что образование матрицы происходит неоднородно как по высоте каркаса, так и по его толщине. При этом наибольшая скорость осаждения достигается в нижней части каркаса. Также результаты расчета показывают, что скорость осаждения на внешней поверхности каркаса выше, чем в его внутренних областях. Следствием этого является преждевремен-

ное закупоривание поверхностных пор до того, как каркас полностью уплотнится матрицей. В результате в получаемом композиционном материале образуется значительная остаточная пористость, распределение которой в объеме каркаса после завершения процесса приведено на рис. 7.

Также проведено исследование влияния мощности нагрева реактора на начальный момент процесса уплотнения каркаса. Мощность варьировали в диапазоне от 2500 до 3500 Вт. Результаты расчета скорости осаждения матрицы по толщине каркаса для трех значений мощности нагрева приведены на рис. 8. Хорошо видно, что уменьшение температуры процесса (вследствие уменьшения мощности нагрева) приводит к более однородному распределению скорости осаждения по толщине каркаса. Известно, что однородность уплотнения каркаса определяется отношением скорости переноса МТС в глубь пористой среды к скорости гетерогенной химической реакции осаждения SiC. При более

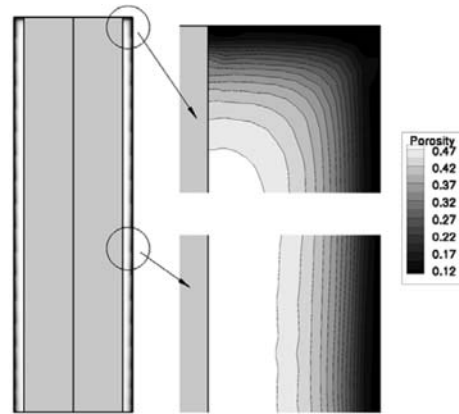


Рис. 7. Распределение остаточной пористости по объему каркаса

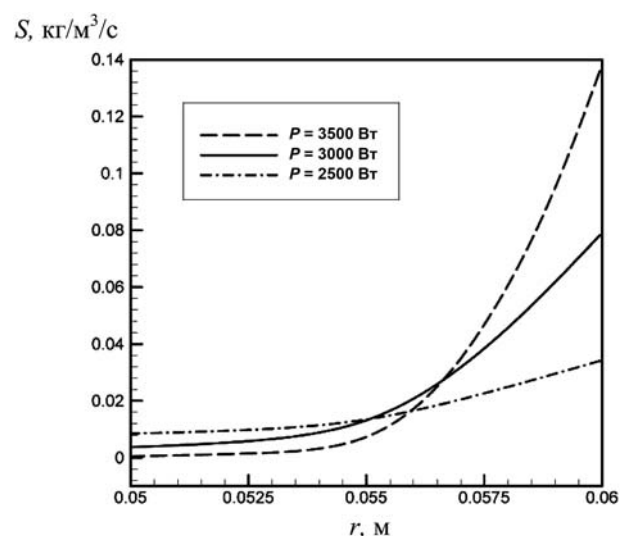


Рис. 8. Распределение скорости осаждения матричного материала по толщине каркаса в его нижней части для различных значений мощности нагрева реактора

высоких температурах (большие мощности нагрева) скорость химической реакции значительно превышает скорость массопереноса. В результате МТС не успевает проникать во внутренние области каркаса, практически полностью разлагаясь во внешних слоях. При более низких температурах скорости разложения МТС и его переноса становятся соразмерными, обеспечивая более высокий уровень концентрации МТС во внутренних областях каркаса. Следствием этого как раз и является более однородное распределение скорости осаждения матрицы по толщине каркаса, наблюдаемое на рис. 8. Очевидно, что в длительном процессе это приведет к более равномерному уплотнению каркаса и уменьшению общего уровня остаточной пористости в получаемом композите.

### Выводы

В статье рассматривается оригинальная математическая модель, позволяющая описывать процессы уплотнения пористых каркасов для различных модификаций ГНК. На базе разработанной модели создан программный пакет, моделирующий работу технологической установки ГНК. Программный пакет включает как одномерные модели, необходимые для детального исследования процессов эволюции уплотняемых пористых сред, так и двумерные модели, необходимые для описания сопряженного тепломассообмена во всем объеме технологической установки, содержащей газовую область, через которую прокачиваются газовые реагенты, пористую среду каркаса и твердые части реактора. Данный программный пакет позволяет исследовать влияние основных технологических параметров процесса на качество получаемого материала, проводить оптимизацию процессов и формулировать управляющую программу для системы управления процессом.

В качестве примера с помощью разработанного пакета программ было проведено исследование процессов уплотнения пористого каркаса углеродной и карбидокремниевой матрицей методом изотермического ГНК, причем задача решалась как в одномерной, так и в двумерной постановках. В результате проведенных одномерных численных исследований показано, что процессы насыщения разномасштабных пор в реальных каркасах существенно отличаются. Это является основанием для проведения процесса в две стадии с индивидуальными режимами на каждой стадии. Результаты исследований позволяют оценить эффективность двухстадийного ИГНК для получения каркасов различной толщины с заданной остаточной пористостью. Проведенное сравнение одностадийного и двухстадийного процесса, когда на первой стадии температура процесса соответствует оптимальной для насыщения внутрипучковых пор, а на второй —

межпучковых пор, показало, что двухстадийное ИГНК для получения требуемой пористости может проводиться при более высокой температуре, что обеспечивает значительное сокращение времени процесса.

С использованием программного пакета в двумерной постановке проведен анализ процесса изотермического ГНК получения композита с SiC-матрицей. Исследована структура течения и распределение температуры и концентраций компонентов смеси в газовом объеме реактора и пористом каркасе. Выявлена неоднородность полей температуры и концентраций компонентов в реакционном объеме реактора, следствием чего является неоднородное распределение скорости осаждения матричного материала. Это приводит в ходе длительного процесса уплотнения к неоднородности характеристик качества получаемого материала как по толщине, так и по длине каркаса. Проведено исследование влияния мощности нагрева реактора на процесс уплотнения каркаса. Показано, что уменьшение мощности обеспечивает более равномерное осаждение матричного материала по толщине каркаса, что должно привести в длительном процессе к снижению остаточной пористости получаемого композита.

### Список литературы

1. **Besmann T. M., Sheldon B. W., Lowden R. A., Stinton D. P.** Vapor-phase Fabrication and Properties of Continuous-filament Ceramic Composites // *Science*. 1991. V. 253. P. 1104—1109.
2. **Chang H.-C., Morse T. F., Sheldon B. W.** Minimizing Infiltration Times during Isothermal Chemical Vapor Infiltration with Methyltrichlorosilane // *J. Am. Ceram. Soc.* 1997. V. 80. P. 1805—1811.
3. **Kulik V. I., Kulik A. V., Ramm M. S., Makarov Yu. N.** Modeling of SiC-Matrix Composite Formation by Isothermal Chemical Vapour Infiltration // *J. Crystal Growth*. 2004. V. 266. P. 333—339.
4. **Кулик В. И., Кулик А. В., Рамм М. С.** Исследование термодиффузионных процессов газофазного насыщения SiC-матрицей сложнопористых волокнистых каркасов с 3D-структурой // Тр. первого росс. науч.-техн. симпозиума "Интеллектуальные композиционные материалы и конструкции", (23—24 июня 2004 г., г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана). М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. С. 36—41.
5. **Beckermann C., Ramadhyani S., Viskanta R.** Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a porous layer inside a rectangular enclosure // *J. Heat Transfer*. 1987. V. 109. P. 363—370.
6. **Лалин Ю. В., Стрелец М. Х.** Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989. 368 с.
7. **Гришин А. М., Фомин В. М.** Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984. 318 с.
8. **Ergun S.** Fluid flow through packed columns // *Chemical Engineering Progress*. 1952. V. 48 (2). P. 89—94.
9. **Dupret F., Nicodeme P., Ryckmans Y., Wouters P., Crochet M. J.** Global modeling of heat transfer in crystal growth furnaces // *J. Heat Mass Transfer*. 1990. V. 33. P. 1849—1871.
10. **Кулик А. В.** Автореферат кандидатской диссертации. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004. 20 с.
11. **Малько Д. Б., Островский В. С.** Особенности пористой структуры углерод-углеродных композиционных материалов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 1997. Т. 3. № 4. С. 29—35.

**Е. Б. Коротков**, канд. техн. наук, доц.,

**Г. Л. Левинзон**, канд. техн. наук, доц.,

**А. В. Мороз**, ст. науч. сотр.,

Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д. Ф. Устинова  
e\_korotkov@rambler.ru

## Стабилизация и виброгашение оборудования для нанотехнологий

*Рассматривается оригинальный пневмоамортизирующий активный подвес, предназначенный для изоляции платформы с прецизионным технологическим оборудованием и позиционирующим координатным столом от виброколебаний основания и для стабилизации положения платформы в подвесе при ее возмущениях от перемещений звеньев координатного стола. Предлагается алгоритм комбинированного управления системой приводов пневмоопор подвеса, обеспечивающий эффективную пространственную стабилизацию и активное виброгашение платформы.*

**Ключевые слова:** несущая платформа, координатный стол, вибрирующее основание, пневмоамортизирующая активная опора, силовые воздействия на платформу в четырехопорном подвесе, управление системой приводов пневмоопор

### Введение

Нанотехнологические установки с позиционирующим оборудованием используются в целом ряде наукоемких технологий: полупроводниковой лазерной фотолитографии при производстве сложных микросхем (БИС, СБИС), профилометрии материалов сканирующими туннельными и атомносиловыми микроскопами, интерферометрическом контроле крупногабаритных прецизионных оптических объективов и др. Все технологическое оборудование, за исключением мощных излучателей (лазеров) и управляющих компьютеров, размещают, как правило, на единой несущей платформе. На ней устанавливают и высокоточный координатный стол (КС) для управляемых перемещений в горизонтальной плоскости (по осям  $X$ ,  $Y$ ) предмета, например полупроводниковой пластины, относительно вертикальной оси проекционного объекта нанолитографа. КС может иметь существенные подвижные массы, широкую зону позиционирования и работает не только в стационарных режимах перемещения с постоянной скоростью, но и в старт-стопных режимах быстрого пошагового перемещения предмета (например, в высокопроизводительных фотолитографах-мультипликаторах — в так называемых степперах).

Оптикоэлектронное, оптикомеханическое оборудование на платформе весьма чувствительно к линейным вибрациям пола рабочего помещения по вертикальной оси  $Z$ , обычно более интенсивным,

чем вибрации по осям  $X$  и  $Y$ . В целях изоляции от вибрации пола (основания установки) платформу размещают на мягких пневмоамортизирующих опорах. Виброгашение осуществляется параллельно пассивными (пневмоамортизаторы) и активными (линейные электродвигатели) средствами, обеспечивая требуемое ослабление вынужденных линейных виброколебаний платформы в требуемой полосе частот кинематического возмущающего воздействия [1].

Вместе с тем, размещенная в мягком пневмоподвесе платформа становится чувствительной к силовым возмущениям, возникающим при перемещениях КС: платформа разгоризонтируется и склонна совершать по углам наклона собственные колебания в пневмоподвесе [2]. Демпфирование угловых колебаний, как и виброгашение, целесообразно реализовать пассивно и активно — путем, соответственно, применения в опорах двухкамерных пневмоамортизаторов с дросселированием сжатого воздуха и управления линейными электродвигателями в опорах по сигналам скоростей изменения углов наклона платформы [3]. Статическую стабилизацию углов наклона — горизонтирование платформы — предложено [4] реализовать синхронным и противоположным по знаку регулированием объемов двухкамерных пневмоамортизаторов в диагонально расположенных опорах. В четырехопорном подвесе используются два электромеханических устройства (привода) пневмообменного регулирования, каждое из которых управляется по сигналу датчика наклона платформы.

Избыточные давления сжатого воздуха в пневмоамортизаторах чувствительны к вариациям температуры в рабочем помещении и вариациям атмосферного давления, которые приводят к самопроизвольному всплытию (притапливанию) платформы. Для стабилизации положения платформы по трем координатам — по двум углам наклона и высоте всплытия — рассматривается более полный вариант активного четырехопорного подвеса, с устройством пневмообъемного регулирования в каждой опоре. Кроме этого, в каждую опору введен не только осевой (по  $Z$ ), но и радиальный (по  $X$  или  $Y$ ) линейный электродвигатель для линейного активного виброгашения и демпфирования угловых колебаний платформы в горизонтальной плоскости.

Целью данной работы является синтез эффективного алгоритма комбинированного управления системой приводов четырехопорного пневмоподвеса платформы с оборудованием и позиционирующим координатным столом. Синтез основывается на решении обратной задачи динамики процессов стабилизации и виброгашения, а также на возможностях информационного обеспечения разомкнутого (по кинематическим и силовым возмущениям) и замкнутого управления системой приводов.

## Устройство и характеристики пневмоамортизирующей активной опоры

Устройство опоры отображено на рис.1. Технические решения активной опоры защищены патентами [4, 5].

Опора устанавливается между виброизолируемой платформой 1 и вибрирующим основанием 2. Рабочая камера 3 и регулируемая камера 4 двухкамерного пневмоамортизатора соединены через дроссель 5. Камера 4 размещена в устройстве пневмообъемного регулирования (УПР). Нагрузку  $F_H$  через опорную ось 6 и поршень 10 уравнивает избыточное давление  $P_1$  сжатого воздуха в рабочей камере. Опорная ось жестко механически связана с платформой 1 и поршнем 10, поэтому и опорная ось, и поршень являются по сути "продолжением" платформы как твердого тела. Через поршень рабочей камеры реализуется присоединение платформы к упругим амортизирующим элементам — к "пневмопружине" сжатого воздуха в камерах 3, 4 и к резиновой диафрагме 11. Последняя позволяет перемещаться корпусу камеры 3 (основанию 2) относительно поршня 10 (платформы 1) в вертикальных и радиальных направлениях линейных вибраций, а также наклоняться поршню (платформе) на небольшие углы относительно стогоризонтированного основания.

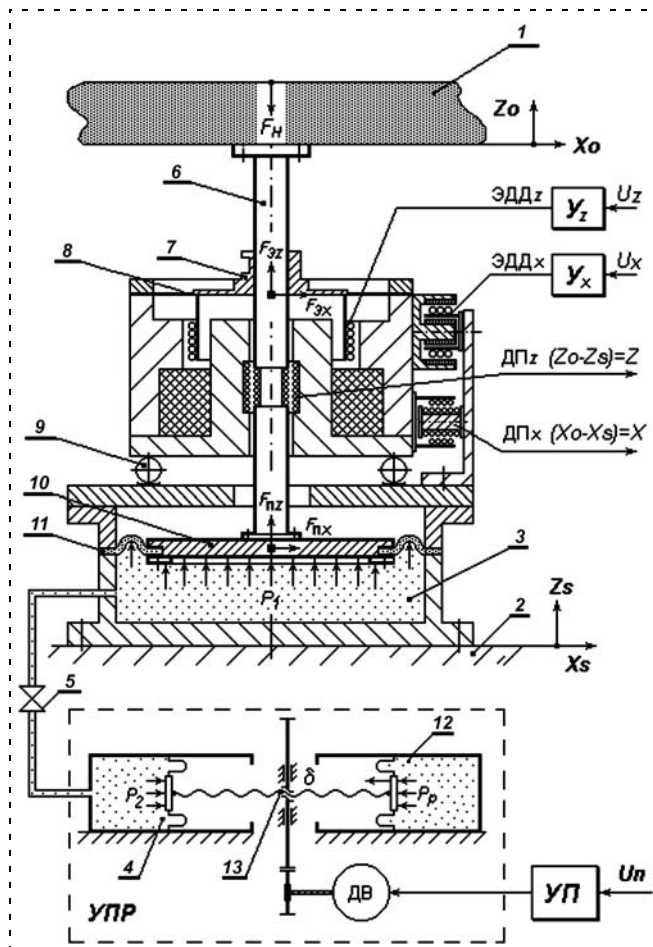


Рис. 1. Пневмоамортизирующая активная опора

УПР содержит две однотипные регулируемые камеры 4, 12 с встречно направленными поршнями, жестко соединенными штоком-винтом 13. Камера 12 используется как пневмопружина статической разгрузки сил на штоке-винте, благодаря чему снижается требуемая мощность электродвигателя ДВ, который через необратимую передачу "гайка—винт" смещает поршень камеры 4 пневмоамортизатора на расстояние  $\delta$  и тем самым изменяет рабочий объем камеры. Как следствие, изменяется избыточное давление  $P_1$  и сила  $F_{pz}$  на поршне 10 рабочей камеры. В УПР применен шаговый электродвигатель с частотным управлением от усилителя-преобразователя (УП). В целом электропривод с одноступенчатым редуктором, передача "гайка—винт" и регулируемый двухкамерный амортизатор образуют астатический электропневмопривод (ЭПП) изменения силы  $F_{pz}$  на поршне. Линеаризованная в рабочей точке нагруженного пневмоамортизатора передаточная функция ЭПП определяется выражением:

$$W_{\text{ЭПП}}(p) = \frac{F_{pz}(p)}{U_{\text{п}}(p)} = \frac{K_{\text{ЭПП}}}{p(1+pT_b)};$$

$$K_{\text{ЭПП}} = \frac{S_2(S_1 P_a + F_H)}{V_1 + V_2} K_{\delta}; T_b = \frac{V_1 V_2}{(V_1 + V_2) B} \frac{\mu}{\rho R T}, \quad (1)$$

где  $S_1, S_2$  — эффективные площади поршней рабочей и регулируемой камер;  $F_H, P_a$  — средние (номинальные) значения нагрузки пневмоамортизатора и атмосферного давления;  $V_1, V_2$  — средние значения объемов рабочей и регулируемой камер;  $K_{\delta}$  — коэффициент передачи астатического шагового электропривода и пары "гайка—винт", равный отношению скорости  $\delta$  перемещения штока-винта к управляющему сигналу  $U_{\text{п}}$  на входе УП;  $B$  — коэффициент пропорциональности между объемными расходом воздуха через дроссель и перепадом давлений  $P_1, P_2$  в камерах;  $\mu, \rho, T$  — молекулярная масса, плотность и средняя абсолютная температура сжатого воздуха в пневмоамортизаторе;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Пассивные упругодемпфирующие свойства пневмоамортизатора характеризуются его осевой и радиальной динамической жесткостью — приращением сил на поршне 10 рабочей камеры, вызванных относительноными перемещениями корпуса камеры и поршня. Осевая (по оси  $Z$ ) динамическая жесткость равна сумме осевых динамических жесткостей сжатого воздуха в камерах пневмоамортизатора и резиновой диафрагмы 11 [3]:

$$C_z(p) = \frac{F_{pz}(p)}{Z_s(p) - Z_0(p)} = C_{bz} \frac{1+pT_a}{1+pT_b} + C_{dz}(1+p\tau_z);$$

$$C_{bz} = \frac{S_1(S_1 P_a + F_H)}{V_1 + V_2}; T_a = \frac{V_2}{B} \frac{\mu}{\rho R T}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что постоянная времени  $T_a$  пропорциональна объему регулируемой камеры, а постоянная времени  $T_b$  — среднегеометрическому

объему регулируемой и рабочей камер пневмоамортизатора, причем  $T_a/T_b = 1 + V_2/V_1$ . Подбором дросселя (коэффициента  $B$ ) обеспечивают условие эффективного демпфирования собственных, с круговой частотой  $\omega_0$ , вертикальных колебаний системы амортизатор—нагрузка:  $T_a^{-1} < \omega_0 < T_b^{-1}$ . Статическая осевая жесткость диафрагмы  $C_{дз}$  обычно в 3...4 раза меньше, чем  $C_{вз}$ . Объясняется это тем, что "торообразная" в подкаченном состоянии диафрагма может перекачиваться между поршнем и корпусом рабочей камеры. Постоянная времени  $\tau_z$  вязких сил внутреннего трения деформируемой диафрагмы имеет порядок 0,01...0,02 с.

Радиальная (по осям  $X, Y$ ) динамическая жесткость пневмоамортизатора обусловлена упругими и вязкими силами только резиновой диафрагмы 11:

$$C_Y(p) = C_X(p) = \frac{F_{пх}(p)}{X_s(p) - X_0(p)} = C_{дх}(1 + p\tau_x). \quad (3)$$

Статическая радиальная жесткость  $C_{дх}$  "торообразной" диафрагмы примерно в три раза больше, чем  $C_{дз}$  и сравнима по величине с  $C_{вз}$ . Диафрагма обеспечивает самоцентрирование поршня относительно корпуса рабочей камеры и тем самым осуществляет пассивную статическую стабилизацию положения платформы относительно основания по осям  $X$  и  $Y$  и по углу поворота вокруг оси  $Z$ . Постоянная времени  $\tau_x$  вязких сил внутреннего трения деформируемой диафрагмы имеет порядок 0,01...0,03 с.

В пневмоамортизирующую опору введены осевой и радиальный электродинамические двигатели (ЭДЗ и ЭДХ). Осевой линейный электродвигатель выполнен с постоянным электромагнитом, а радиальный — с постоянным магнитом на редкоземельных материалах. Сила  $F_{эз}$ , развиваемая осевым ЭДД, передается на опорную ось 6 через муфту 7, а сила  $F_{эх}$ , развиваемая радиальным ЭДД, передается на опорную ось через статор осевого ЭДД и металлическую мембрану 8. Статор осевого ЭДД установлен на корпусе пневмокамеры 3 с помощью шарикоподшипника 9 с малым коэффициентом трения. Мембрана и шарикоподшипник обеспечивают постоянство зазоров между статором и якорем каждого ЭДД в условиях линейных виброперемещений корпуса пневмокамеры (основания) по осям  $X, Y, Z$ . Как следствие, обеспечивается стабильность и линейность характеристик обоих двигателей. Вместе с усилителями мощности  $U_Z$  и  $U_X$ , в которых реализована глубокая отрицательная обратная связь по току, осевой и радиальный ЭДД образуют малоинерционные (с постоянной времени менее  $10^{-3}$  с) силовые электродинамические приводы (ЭДП) с коэффициентами передачи  $K_{эдпз} = F_{эз}(p)/U_Z(p)$ ; и  $K_{эдпх} = F_{эх}(p)/U_X(p)$ . В опору введены также два высокочувствительных индуктивных датчика ДПЗ, ДПХ осевого и радиального перемещения опорной оси 6 относительно основания.

## Силовые моменты воздействия на объект виброзащиты в активном четырехопорном подвесе

На рис. 2 приведена схема размещения объекта в активном пневмоподвесе.

Четыре опоры  $O_1, O_2, O_3, O_4$  установлены в вершинах прямоугольника со сторонами  $2A$  и  $2B$ , параллельными осям позиционирования координатного стола. КС имеет два звена: первое, массой  $m_{1к}$ , перемещается на несущей платформе по оси  $O_K X_K$  и несет на себе второе звено, массой  $m_{2к}$ , которое перемещается вдоль оси  $O_K Y_K$  относительно первого звена и платформы. Отсчет координат  $X_K, Y_K$  перемещения звеньев принят от центра  $O_K$  зоны позиционирования КС. Положению звеньев КС в центре  $O_K$  соответствует номинальное положение "0" центра масс объекта. Центр  $O_K$  в системе  $O X_O Y_O$  имеет координаты  $a_K, b_K$ .

Опоры  $O_1, \dots, O_4$  установлены симметрично относительно номинального положения "0" центра масс, что обеспечивает равномерное распределение суммарной силы тяжести  $mg$  объекта по четырем опорам. Равная номинальная нагрузка опор делает

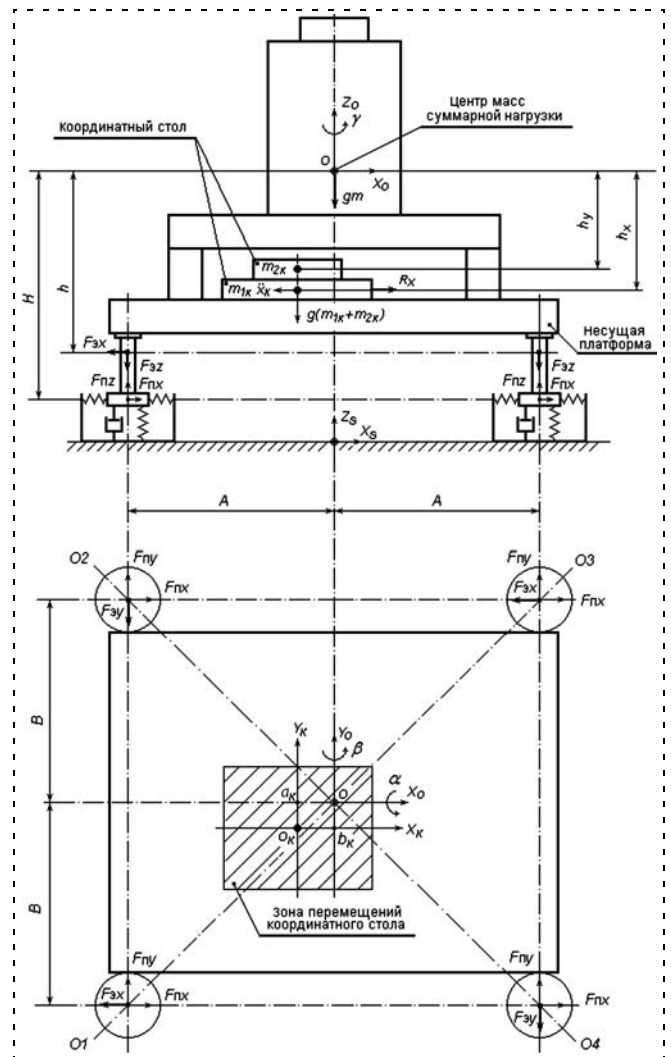


Рис. 2. Распределение нагрузки и силомоментные воздействия на объект виброзащиты в четырехопорном пневмоподвесе

практически одинаковыми осевые (2) и радиальные (3) динамические жесткости пневмоамортизаторов, а также одинаковыми передаточные функции (1) электропневматических пневмоприводов в опорах. При ненулевых значениях  $x_K, y_K$  центр масс объекта смещается относительно опор. Обычно массы  $m_{1K}, m_{2K}$  подвижных звеньев КС в десятки раз меньше суммарной массы  $m$  объекта, и диапазоны перемещений КС в 4...5 раз меньше сторон прямоугольника подвеса. Вследствие этого изменение расстояний  $A$  и  $B$  не превышает 1...2 %, чем можно пренебречь, а положение центра масс объекта полагать неизменным при нахождении КС в любой точке зоны позиционирования. Номинальное положение "О" центра масс является полюсом объекта, который совершает линейные перемещения  $x_0, y_0, z_0$ , а объект поворачивается вокруг полюса на углы тангажа  $\alpha$ , крена  $\beta$  и рысканья  $\gamma$ .

Из рис. 2 видно, что полюс объекта располагается на расстоянии  $H$  выше плоскости радиальных упругих сил  $F_{пX}, F_{пY}$  диафрагм поршней амортизаторов, т. е. объект в подвесе представляет собой "перевернутый маятник". Это обстоятельство снижает запас устойчивости свободных движений объекта в упруговязком подвесе.

На расстоянии  $h_X, h_Y$  полюс выше плоскостей направляющих первого и второго звеньев КС; через направляющие на платформу действуют силы динамической реакции  $R_X = -(m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K, R_Y = -m_{2K}\ddot{y}_K$  приводов КС на интервалах разгона (торможения) звеньев с ускорениями  $\ddot{x}_K, \ddot{y}_K$ .

В опорах  $O_1$  и  $O_3$  пара радиальных ЭДД и ДП ориентирована по оси  $X$ , а в опорах  $O_2$  и  $O_4$  — по оси  $Y$ . Плоскость радиальных сил  $F_{эX}, F_{эY}$  линейных электродвигателей и измеряемых датчиками ДПх и ДПу радиальных перемещений объекта и основания располагается на расстоянии  $h$  ниже полюса объекта.

Источниками силомоментных возмущений объекта в пневмоподвесе являются: линейные виброперемещения  $x_S, y_S, z_S$  основания, инициирующие возмущающие силы в пневмоамортизаторах, пропорциональные их динамическим жесткостям; изменение координат  $x_K, y_K$  сил тяжести звеньев КС; силы  $R_X, R_Y$  динамических реакций приводов КС.

Главные относительно полюса "О" объекта (приведенные к полюсу) возмущающие силы равны:

$$\left. \begin{aligned} N_{XO} &= 4C_X(p)x_S - (m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K; \\ N_{YO} &= 4C_Y(p)y_S - m_{2K}\ddot{y}_K; \\ N_{ZO} &= 4C_Z(p)z_S. \end{aligned} \right\} (4)$$

Главные относительно осей  $x_O, y_O, z_O$  (приведенные к осям) возмущающие моменты равны:

$$\left. \begin{aligned} Q_\alpha &= H \cdot 4C_Y(p)y_S - m_{2K}gy_K - h_Y m_{2K}\ddot{y}_K; \\ Q_\beta &= -H \cdot 4C_X(p)x_S + (m_{1K} + m_{2K})gx_K + \\ &+ h_X(m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K; \\ Q_\gamma &= b_K(m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K - (x_K + a_K)m_{2K}\ddot{y}_K. \end{aligned} \right\} (5)$$

Главные управляющие силы и моменты, развиваемые приводами подвеса, приведем для каждой группы приводов.

Для радиальных электродинамических приводов (ЭДП<sub>X1</sub>, ЭДП<sub>X3</sub>, ЭДП<sub>Y2</sub>, ЭДП<sub>Y4</sub>):

$$\left. \begin{aligned} F_{XO} &= 2K_{ЭДПX}U_{XO}; & F_{YO} &= 2K_{ЭДПY}U_{YO}; \\ M_{\gamma X} &= B \cdot 2K_{ЭДПX}U_{\gamma X}; & M_{\gamma Y} &= A \cdot 2K_{ЭДПY}U_{\gamma Y}; \\ Q_{э\beta} &= -h \cdot 2K_{ЭДПX}U_{XO}; & Q_{э\alpha} &= h \cdot 2K_{ЭДПY}U_{YO}, \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $U_{XO}, U_{YO}$  — сигналы управления главными силами, а  $U_{\gamma X}, U_{\gamma Y}$  — сигналы управления главным моментом  $M_\gamma = M_{\gamma X} + M_{\gamma Y}$ , равным сумме моментов, развиваемых группой радиальных приводов;  $Q_{э\beta}, Q_{э\alpha}$  — сопутствующие возмущающие моменты, возникающие при развитии управляющих сил  $F_{XO}, F_{YO}$ .

Для групп осевых электродинамических (ЭДП<sub>Z1</sub>, ЭДП<sub>Z2</sub>, ЭДП<sub>Z3</sub>, ЭДП<sub>Z4</sub>) и электропневматических (ЭПП<sub>Z1</sub>, ЭПП<sub>Z2</sub>, ЭПП<sub>Z3</sub>, ЭПП<sub>Z4</sub>) приводов:

$$\left. \begin{aligned} F_{ZO} &= 4K_{ЭДПZ}U_{ZO}; & F_{пZO} &= 4W_{ЭПП(p)}U_{пZO}; \\ M_\alpha &= B \cdot 4K_{ЭДПZ}U_\alpha; & M_{п\alpha} &= B \cdot 4W_{ЭПП(p)}U_{п\alpha}; \\ M_\beta &= A \cdot 4K_{ЭДПZ}U_\beta; & M_{п\beta} &= A \cdot 4W_{ЭПП(p)}U_{п\beta}, \end{aligned} \right\} (7)$$

где  $U_{ZO}, U_\alpha, U_\beta$  — сигналы управления главной силой  $F_{ZO}$  и главными моментами  $M_\alpha, M_\beta$  группы четырех электродинамических приводов;  $U_{пZO}, U_{п\alpha}, U_{п\beta}$  — то же для группы четырех электропневматических приводов.

#### Уравнения движения объекта, решение обратной задачи динамики активной стабилизации и виброгашения

В предположении, что объект в пневмоподвесе совершает малые движения по главным линейным  $x_0, y_0, z_0$  и угловым  $\alpha, \beta, \gamma$  абсолютным координатам вблизи устойчивого положения равновесия, получены линеаризованные дифференциальные уравнения движений. В операторной форме система из шести уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} [mp^2 + 4C_X(p)]x_0 &= \\ &= [H \cdot 4C_X(p) + mg]\beta + N_{XO} + F_{XO}; \\ [mp^2 + 4C_Y(p)]y_0 &= \\ &= -[H \cdot 4C_Y(p) + mg]\alpha + N_{YO} + F_{YO}; \\ [mp^2 + 4C_Z(p)]z_0 &= N_{ZO} + F_{ZO} + F_{пZO}; \\ [J_X p^2 + B^2 \cdot 4C_Z(p) + H^2 \cdot 4C_Y(p)]\alpha &= \\ &= -H \cdot 4C_Y(p)y_0 + Q_\alpha + Q_{э\alpha} + M_\alpha + M_{п\alpha}; \\ [J_Y p^2 + A^2 \cdot 4C_Z(p) + H^2 \cdot 4C_X(p)]\beta &= \\ &= H \cdot 4C_X(p)x_0 + Q_\beta + Q_{э\beta} + M_\beta + M_{п\beta}; \\ [J_Z p^2 + B^2 \cdot 4C_X(p) + A^2 \cdot 4C_Y(p)]\gamma &= \\ &= Q_\gamma + M_{\gamma X} + M_{\gamma Y}, \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $p$  — оператор дифференцирования;  $J_X, J_Y, J_Z$  — главные центральные моменты инерции объекта;  $m$  — масса объекта;  $g$  — ускорение свободного падения; совокупность главных возмущающих ( $N_i, Q_i$ ) и управляющих ( $F_i, M_i$ ) внешних сил и моментов определяется выражениями (4)–(7).



Из (8) видно, что собственные движения объекта в пневмоподвесе независимы только по координатам  $z_0$  и  $\gamma$ , а в парах координат  $x_0, \beta$  и  $y_0, \alpha$  есть взаимовлияние движений через операторы, которые специально перенесены в правые части уравнений. Эти операторы, как показало исследование, уменьшают запас статической и динамической устойчивости объекта в пневмоподвесе, поэтому их целесообразно скомпенсировать соответствующим управлением системой приводов.

Обратная задача динамики требуемого движения объекта сводится к отысканию соответствующих управляющих воздействий на объект. Идеальная стабилизация (статическая и динамическая, включая виброгашение) объекта означает его постоянное нахождение в положении равновесия  $x_0 \equiv 0, y_0 \equiv 0, z_0 \equiv 0, \alpha \equiv 0, \beta \equiv 0, \gamma \equiv 0$ , для чего необходимо, чтобы главные управляющие силы и моменты ( $F_i, M_i$ ) все время компенсировали соответствующие главные возмущающие силы и моменты ( $N_i, Q_i$ ) в правых частях уравнений (8). Выполнение этого возможно способом разомкнутого управления по возмущениям объекта, который согласно выражениям (4), (5) должен реализовываться по сигналам задаваемых переменных состояния КС и по измеряемым виброперемещениям основания  $x_S, y_S, z_S$ . Для оценки последних используем акселерометры основания, измеряющие линейные ускорения  $\ddot{x}_S, \ddot{y}_S, \ddot{z}_S$  с последующим двукратным интегрированием сигналов апериодическими интеграторами с передаточной функцией  $T^2/(1+pT)^2$ .

Разомкнутое (компенсационное) управление, которому присущи неизбежные погрешности, дополним замкнутым управлением с отрицательными демпфирующими обратными связями по скоростям  $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$  изменения выходных угловых координат и по скоростям  $\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$  линейных виброперемещений полюса объекта. Для оценки последних применим установленные на объекте (близ его центра масс) акселерометры, измеряющие линейные ускорения  $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0$ , с последующим однократным интегрированием сигналов апериодическими интеграторами с передаточной функцией  $T/(1+pT)$ . Наряду с демпфирующими используем и главные отрицательные обратные связи по углам  $\alpha, \beta$  наклона и по относительному вертикальному перемещению  $z = z_0 - z_S$  полюса объекта в целях статической стабилизации горизонтального положения и средней высоты всплытия объекта над основанием в условиях возможных медленных вариаций атмосферного давления и температуры в рабочем помещении. Эти главные обратные связи используем при управлении группой астатических электропневмоприводов подвеса.

На основании изложенного, с учетом формул (4)–(8) получены выражения для формирования сигналов управления главными силами и моментами системы приводов пневмоподвеса.

Для группы радиальных электродинамических приводов:

$$\left. \begin{aligned} U_{XO} &= \frac{1}{2K_{ЭДПХ}} \left[ -(H \cdot 4C_X(p) + mg)\beta + \right. \\ &+ (m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K - 4C_X(p) \frac{T^2}{(1+pT)^2} \ddot{x}_S \left. \right] - \\ &- K_X \frac{T}{(1+pT)} \dot{x}_O; \\ U_{\gamma X} &= \frac{1}{B \cdot 2K_{ЭДПХ}} [-b_K(m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K] - K_{\gamma X} \dot{\gamma}; \end{aligned} \right\} (9)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{YO} &= \frac{1}{2K_{ЭДПY}} \left[ (H \cdot 4C_Y(p) + mg)\alpha + m_{2K}\ddot{y}_K - \right. \\ &- 4C_Y(p) \frac{T^2}{(1+pT)^2} \ddot{y}_S \left. \right] - K_Y \frac{T}{(1+pT)} \dot{y}_O; \\ U_{\gamma Y} &= \frac{1}{A \cdot 2K_{ЭДПY}} [(x_K + a_K)m_{2K}\ddot{y}_K] - K_{\gamma Y} \dot{\gamma}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Для группы осевых электродинамических приводов:

$$\left. \begin{aligned} U_{ZO} &= \frac{1}{4K_{ЭДПZ}} \left[ -4C_Z(p) \frac{T^2}{(1+pT)^2} \ddot{z}_S \right] - \\ &- K_Z \frac{T}{(1+pT)} \dot{z}_O; \\ U_{\alpha} &= \frac{1}{B \cdot 4K_{ЭДПZ}} [H \cdot 4C_Y(p)y + h_{Ym_{2K}}\ddot{y}_K - \\ &- h \cdot 2K_{ЭДПY}U_{YO}] - K_{\alpha} \dot{\alpha}; \\ U_{\beta} &= \frac{1}{A \cdot 4K_{ЭДПZ}} [-H \cdot 4C_X(p)x - \\ &- h_X(m_{1K} + m_{2K})\ddot{x}_K + h \cdot 2K_{ЭДПХ}U_{XO}] - K_{\beta} \dot{\beta}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Для группы осевых электропневматических приводов:

$$\left. \begin{aligned} U_{пZO} &= -K_{пZ}z; \\ U_{п\alpha} &= \frac{(1+pT_b)}{B \cdot 4K_{ЭПП}} [m_{2K}g\dot{y}_K] - K_{п\alpha}\alpha - K_{п\alpha}^* \dot{\alpha}; \\ U_{п\beta} &= \frac{(1+pT_b)}{A \cdot 4K_{ЭПП}} [-(m_{1K} + m_{2K})g\dot{x}_K] - \\ &- K_{п\beta}\beta - K_{п\beta}^* \dot{\beta}. \end{aligned} \right\} (12)$$

В данных формулах выражения в квадратных скобках соответствуют разомкнутому (компенсационному) управлению, включая компенсацию операторов взаимного влияния собственных движений объекта в пневмоподвесе по парам координат  $x_0, \beta$  и  $y_0, \alpha$ . Значения коэффициентов  $K_{\gamma X}$  и

$K_{\gamma}$  скоростных отрицательных обратных связей выбираются совместно, с учетом собственных динамических свойств пассивной механической системы по углу  $\gamma$ . Значение коэффициента  $K_{пз}$  главной отрицательной обратной связи по относительной высоте  $Z$  выбирается достаточно малым, чтобы обеспечить астатическую стабилизацию в полосе частот ниже частоты  $T^{-1}$  начала работы обратной связи демпфирования и активного виброгашения по ускорению  $\ddot{z}_0$ . Значения коэффициентов  $K_{п\alpha}$ ,  $K_{п\beta}$  в каналах астатического горизонтирования платформы могут быть в 3...5 раз выше, чем  $K_{пз}$ ; выбором коэффициентов скоростных обратных связей  $K_{п\alpha}^*$ ,  $K_{\alpha}$  и  $K_{п\beta}^*$ ,  $K_{\beta}$  реализуется ПИД-регулирование горизонтированием, осуществляемое совместно группами осевых астатических и статических приводов. Эффективность замкнутого управления активным виброгашением по сигналам ускорений  $\ddot{x}_0$ ,  $\ddot{y}_0$ ,  $\ddot{z}_0$  объекта может быть увеличена введением в каналы последовательных корректирующих звеньев с передаточными функциями вида  $W_{K3}(p) = (1 + pT_1)/(1 + pT_2)$  при  $T > T_1 > T_2$ .

### Алгоритм комбинированного управления системой приводов четырехопорного пневмоамортизирующего подвеса объекта

Структура алгоритма представлена на рис. 3 в форме схемы блока управления системой приводов.

В блоке датчиков осевых перемещений опор (БДП<sub>z</sub>) вычисляются оценки вертикального относительного перемещения  $z = z_0 - z_s$  полюса (номинального положения центра масс) объекта и основания, а также оценки углов наклона  $\alpha$  и  $\beta$  объекта относительно сгоризонтированного основания:

$$\left. \begin{aligned} \hat{z} &= \frac{1}{4}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4); \\ \hat{\alpha} &= \frac{1}{4B}(-z_1 + z_2 + z_3 - z_4); \\ \hat{\beta} &= \frac{1}{4A}(z_1 + z_2 - z_3 - z_4). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В блоках датчиков радиальных перемещений опор (БДП<sub>x</sub>, БДП<sub>y</sub>) вычисляются оценки относительных боковых перемещений  $x = x_0 - x_s$ ,  $y = y_0 - y_s$  полюса объекта и основания, а также оценки угла рысканья  $\gamma$  объекта:

$$\left. \begin{aligned} \hat{x} &= \frac{1}{2}(x_1 + x_3) + h\hat{\beta}; \hat{y} = \frac{1}{2}(y_2 + y_4) - h\hat{\alpha}; \\ \hat{\gamma}_X &= \frac{1}{2B}(x_1 - x_3); \hat{\gamma}_Y = \frac{1}{2A}(-y_2 + y_4), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где оценки  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{\alpha}$  определены формулами (13), а поправки  $h\hat{\beta}$  и  $h\hat{\alpha}$  внесены для исключения смещений оценок  $\hat{x}$  и  $\hat{y}$ , появляющихся при наклонах объекта.

Косвенно измеряемые согласно (13) и (14) переменные используются в алгоритме комбинированного управления (9)–(12) группами приводов.

В блоке управления БУ<sub>п</sub> осевыми электропневматическими приводами вычисляются по выражениям (12) сигналы  $U_{пZO}$ ,  $U_{п\alpha}$ ,  $U_{п\beta}$  управления группой приводов и формируются сигналы управления каждым электропневмоприводом в группе:

$$\left. \begin{aligned} U_{п1} &= U_{пZO} - U_{п\alpha} + U_{п\beta}; \\ U_{п2} &= U_{пZO} + U_{п\alpha} + U_{п\beta}; \\ U_{п3} &= U_{пZO} + U_{п\alpha} - U_{п\beta}; \\ U_{п4} &= U_{пZO} - U_{п\alpha} - U_{п\beta}. \end{aligned} \right\}$$

В блоке управления БУ<sub>z</sub> осевыми электродинамическими приводами определяются согласно выражениям (11) сигналы  $U_{ZO}$ ,  $U_{\alpha}$ ,  $U_{\beta}$  управления группой приводов и формируются сигналы управления каждым осевым электродинамическим приводом:

$$\left. \begin{aligned} U_{Z1} &= U_{ZO} - U_{\alpha} + U_{\beta}; \\ U_{Z2} &= U_{ZO} + U_{\alpha} + U_{\beta}; \\ U_{Z3} &= U_{ZO} + U_{\alpha} - U_{\beta}; \\ U_{Z4} &= U_{ZO} - U_{\alpha} - U_{\beta}. \end{aligned} \right\}$$

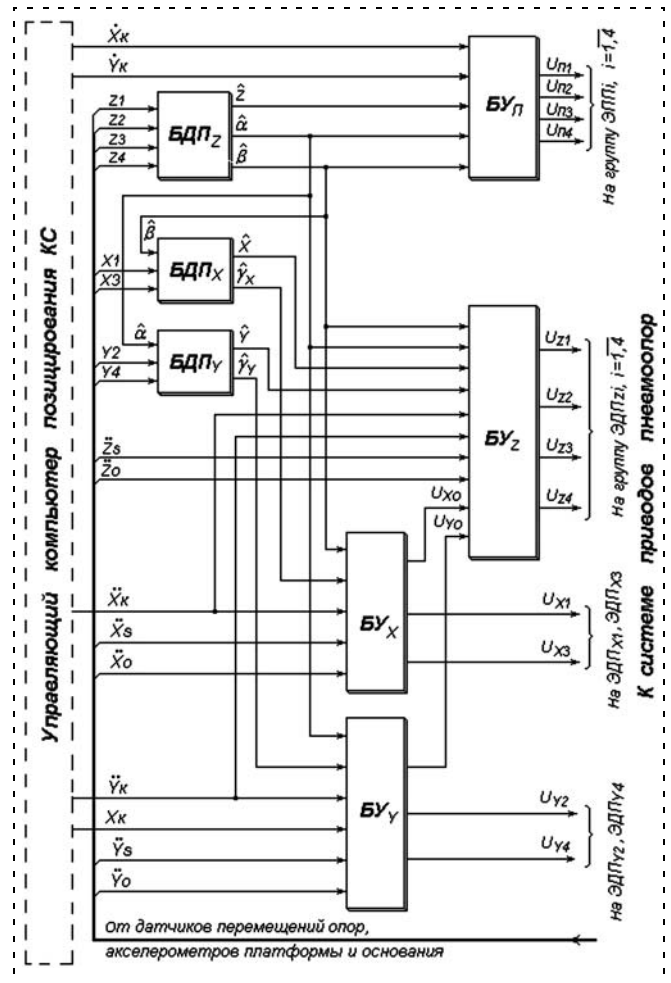


Рис. 3. Схема блока управления системой приводов пневмоподвеса

В блоках управления БУ<sub>X</sub> и БУ<sub>Z</sub> радиальными электродинамическими приводами определяются по выражениям соответственно (9) и (10) сигналы  $U_{XO}$ ,  $U_{\gamma X}$  и  $U_{YO}$ ,  $U_{\gamma Y}$  управления парами приводов в диагональных опорах подвеса и формируются сигналы управления каждым радиальным приводом:

$$\left. \begin{aligned} U_{X1} &= U_{XO} + U_{\gamma X}; & U_{Y2} &= U_{YO} - U_{\gamma Y}; \\ U_{X3} &= U_{XO} - U_{\gamma X}; & U_{Y4} &= U_{YO} - U_{\gamma Y}. \end{aligned} \right\}$$

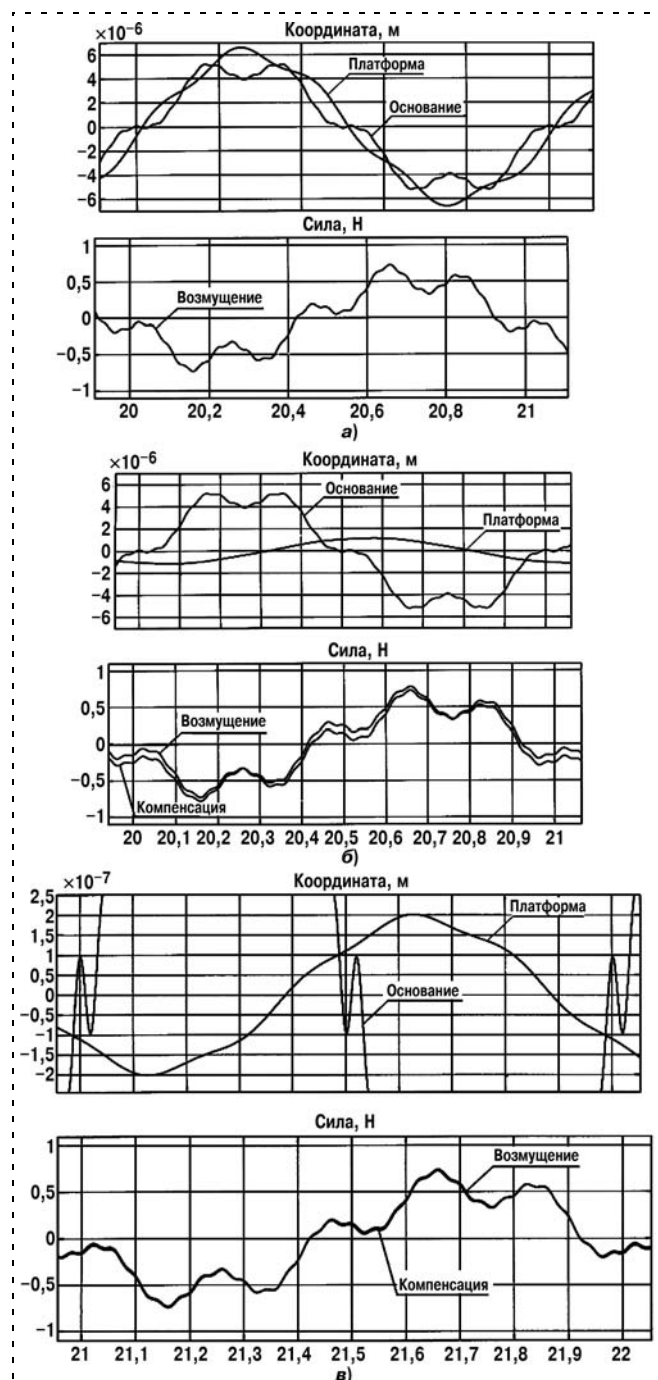


Рис. 4. Ослабление по оси Z фоновых вибраций основания: а — пассивное пневмоамортизаторами; б — пассивно-активное по сигналу акселерометра платформы; в — пассивно-активное по сигналам акселерометров платформы и основания

Синтезированный алгоритм проверялся сравнительным моделированием процессов стабилизации и виброгашения несущей платформы реальной нанотехнологической установки.

Моделирование движений платформы на спокойном (не вибрирующем) основании показало, что при перемещении звеньев КС с максимальной скоростью и максимальным ускорением в пределах всей зоны позиционирования положение платформы стабилизировалось относительно основания в точках присоединения к пневмопорам с динамическими ошибками не более  $\pm 5$  мкм. Основной вклад (до 80 %) в парирование силовых возмущений со стороны КС вносит разомкнутое (компенсационное) управление системой приводов подвеса. Статическое (при неподвижном КС) положение платформы стабилизировалось с нулевыми ошибками.

Моделирование процесса виброгашения стабилизированной платформы показало, что вклад в ослабление вибраций примерно одинаков для замкнутого и разомкнутого управлений. На рис. 4 проиллюстрированы пассивное и активное ослабление на платформе по оси Z полигармонических фоновых виброколебаний основания с амплитудами 5 мкм на частоте 1 Гц; 1 мкм на частоте 5 Гц; 0,1 мкм на частоте 25 Гц. Рис. 4 свидетельствует о заметном ослаблении пневмоамортизатором среднечастотного (25 Гц) колебания основания и малую его эффективность на низких частотах (1 Гц, 5 Гц), близких к резонансной частоте (примерно 2,3 Гц) системы "амортизатор—объект". Эффективность пассивно-активного виброгашения значительно выше именно в области низких и средних частот. Это обусловлено малым различием пропущенной амортизатором возмущающей силы (на рис. 4 она показана



Рис. 5. Пневмоамортизирующая активная опора (кожух снят)

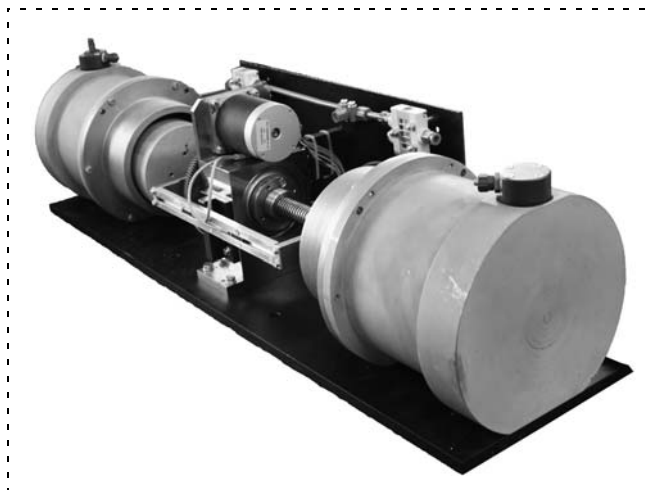


Рис. 6. Устройство пневмообъемного регулирования

инвертированной) и компенсирующей ее управляемой силы, развиваемой осевым электродинамическим приводом в опоре.

Таким образом, моделирование подтвердило перспективность предложенной пневмоамортизирующей активной опоры и четырехопорного вибро-

изолирующего подвеса на ее основе, а также свидетельствует о высокой эффективности синтезированного алгоритма комбинированного управления системой приводов подвеса.

Техническая реализация основных исполнительных элементов рассмотренной системы стабилизации и виброгашения представлена на рис. 5 и 6.

#### Список литературы

1. **Коловский М. З.** Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Наука, 1978. 320 с.
2. **Выговский К. А., Коротков Е. Б., Мороз А. В., Сысоев С. Н.** Система активной виброзащиты и горизонтирования ультрапрецизионного контрольно-измерительного и технологического оборудования // Тез. докл. Первой междунар. конф. "Нанотехнология, наноэлектроника и криоэлектроника (ННК-92)". Барнаул, 1992. С. 182—183.
3. **Мороз А. В., Коротков Е. Б., Левинзон Г. Л., Сережин А. В.** Активная виброзащита и горизонтирование технологической платформы с позиционирующим оборудованием // Сб. тр. "Робототехника и мехатроника". М-СПб., РАН-БГТУ, 1996. С. 198—203.
4. **Патент РФ 2020324.** Виброзащитное устройство с угловой стабилизацией. К. А. Выговский, Е. Б. Коротков, А. В. Мороз и др. Оpubл. в БИ, 1994, вып. 18.
5. **Патент РФ 222279.** Виброизолирующая опора. Е. Б. Коротков, Г. Л. Левинзон, А. В. Мороз, Ю. Ф. Юрченко. Оpubл. в БИ, 2004. Вып. 3.

УДК 621.01:621.91.01:62-5

**Д. В. Васильков**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.,

**Т. Б. Кочина**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

**А. С. Александров**<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup> БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова,

<sup>2</sup> Филиал Тюменского государственного нефтегазового университета в г. Нижневартовске  
vasilkovdv@yandex.ru

## Учет контактных взаимодействий в подвижных и неподвижных соединениях звеньев технологических машин в задачах динамики и управления

*Рассматриваются особенности контактных динамических взаимодействий в технологических машинах для решения задач управления в целях обеспечения требуемых динамических качеств. В качестве примера рассмотрена технологическая система механической обработки.*

**Ключевые слова:** контакт, взаимодействие, динамика, управление, резание, качество

Важным вопросом при построении динамических моделей технологических машин является математическое описание взаимодействия подсистем в трибосопряжениях, т. е. представление оператора, отображающего динамическую характеристику

процессов резания и трения. Для повышения достоверности расчетов при моделировании необходимо дифференцированное описание процессов трения с отказом от квазистатического представления.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные В. Л. Вейцем, Б. В. Дерягиным, В. А. Кудиновым, Т. Н. Лоладзе, Е. М. Макушком, А. П. Семеновым, В. Э. Хитриком, В. А. Шмаковым и другими, показали, что между контактирующими поверхностями, особенно при малых относительных скоростях, происходит местная адгезия — возникают пятна схватывания. Указанное явление было исследовано применительно к процессам резания и трения в рамках нелинейной модели.

Рассматривая контакт как соединение, имеющее конечную контактную жесткость в нормальном и касательном направлениях, следует ожидать микросмещений по этим направлениям. Этот факт был установлен А. В. Верховским [1] и детально исследован в работах [2—5]. В отечественной литературе процесс относительного касательного микросмещения контактирующих твердых тел называется предварительным смещением.

Влияние реологических процессов в контакте твердых тел отображается установленной И. В. Крагельским зависимостью силы трения скольжения от продолжительности неподвижного контакта, имеющей вид [6]

$$F_t = F_0 + (F_\infty - F_0)[1 - \exp(-t/T_b)], \quad (1)$$

где  $F_t$  — значение силы трения при продолжительности  $t$  неподвижного контакта;  $F_\infty$  — значение силы трения при неограниченной продолжительности неподвижного контакта;  $F_0$  — значение силы трения в момент трогания (при времени контакта  $t = 0$ );  $T_B$  — постоянная времени, характеризующая скорость нарастания силы трения в контакте от продолжительности неподвижного контакта.

Зависимость (1) может быть также использована при исследовании контактного взаимодействия пар трения в фазе соприкосновения (схватывания), вызванной адгезией в трибосопряжении, и при переходе из фазы схватывания в фазу скольжения [7].

Новые подходы к рассмотрению процессов трения, в частности, учитывающие нестационарность процессов, гистерезисный характер сил трения, а также связанность процессов контактного взаимодействия в касательном и нормальном контурах, сформировались на основе исследований В. А. Кудинова, Д. М. Толстого и др. [8–12]. Понимание немгновенности процессов, происходящих в зоне контактного взаимодействия твердых тел в реальной несвободной механической системе, а также учет отмеченных выше особенностей привели к формированию понятия о динамической характеристике трения. В основе описания такой характеристики лежат дифференциальные зависимости линейного и кусочно-линейного типов, а также представление о том, что динамическая характеристика трения формируется в процессе динамического взаимодействия подсистем машинного агрегата, включающих рассматриваемую пару трения.

Использование динамической характеристики трения позволяет на современном уровне поставить задачу об устойчивости процесса движения механической системы с трением, а также исследовать фрикционные автоколебания.

В технологических машинах остаются не решенными проблемы обеспечения малых и реверсивных перемещений и исключения массопереноса в высоконагруженных контактных соединениях [13]. Причиной указанных явлений является межатомное взаимодействие между контактирующими поверхностями в трибосопряжении [14]. Оно проявляется в динамике контактных взаимодействий через последовательное формирование и разрыв адгезионных связей [7, 10].

Принципиально адгезионный процесс имеет место при выполнении следующих условий:

- $\delta_{кн} > [\delta_{кн}],$  (2)

где  $\delta_{кн}$  — контактная нормальная деформация;  $[\delta_{кн}]$  — значение контактной нормальной деформации, начиная с которого имеет место адгезионный процесс,

и

- $V_\tau < [V_\tau],$  (3)

где  $V_\tau$  — относительная касательная скорость в контактной паре;  $[V_\tau]$  — значение относительной контактной касательной скорости, при котором начинается адгезионный процесс.

Значение  $[\delta_{кн}]$  и  $[V_\tau]$  зависят от материала контактирующих поверхностей, состояния поверхностей, наличия оксидных пленок и пр.

В зависимости от выполнения условий (2) и (3) можно рассмотреть следующие режимы:

- условия (2) и (3) не выполняются. Если этот режим носит постоянный характер, то контактные процессы являются чисто механическими; если же временный характер, то это означает переход от адгезионного контакта к механическому;
- условия (2) и (3) выполняются. Это означает статический (неподвижный) контакт или переход от механического контакта к адгезионному;
- в динамических режимах движения величины  $\delta_{кн}$  и  $V_\tau$  являются переменными  $\delta_{кн}(t)$  и  $V_\tau(t)$ , так что условия (2) и (3) в процессе движения могут периодически выполняться или нарушаться.

Установлено [7, 12], что в подвижных трибологических системах возможны режимы с устойчивым формированием и разрушением адгезионных связей (кривая 3 на рис. 1), с неустойчивым формированием и разрушением адгезионных связей и, соответственно, развитием релаксационных автоколебаний (кривая 2 на рис. 1) и режимы движения при достаточно высоких скоростях без формирования адгезионных связей и без развития релаксационных автоколебаний (кривая 1 на рис. 1).

Кривые 1, 2, 3 на рис. 1 описывают следующие процессы:

- 1 — чисто механический процесс; имеет место при достаточно высоких скоростях приложения нагрузки; упругая система устойчива в динамическом смысле; релаксационные автоколебания отсутствуют; предварительное смещение равно своему механическому значению  $x_\alpha$ ; сила трения при скольжении постоянна;
- 2 — молекулярно-механический процесс; имеет место в широком диапазоне скоростей прило-

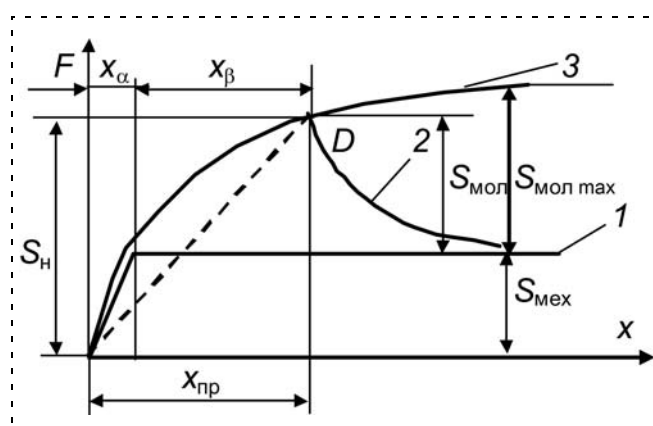


Рис. 1. Характеристики в трибосопряжении в касательном направлении при молекулярно-механическом взаимодействии

жения нагрузки; так как процесс — молекулярно-механический, следовательно, упругая система неустойчива в динамическом смысле; в точке  $D$  происходит переход из фазы схватывания в фазу скольжения и в режим релаксационных автоколебаний; предварительное смещение имеет некоторое адгезионное слагаемое  $x_p$  и составляет величину  $x_{тр}$ ; сила трения при скольжении переменна, так как имеет место адгезионный процесс и изменение несущей способности контактного соединения в касательном направлении;

- 3 — устойчивый молекулярно-механический процесс; имеет место при весьма малых скоростях приложения касательной нагрузки; переход к скольжению не происходит; скорость перемещения весьма мала; смещение может быть достаточно велико.

Механизм формирования и разрушения адгезионных связей в контактирующих поверхностях является причиной развития колебаний в касательном и нормальном контурах контактирующих поверхностей.

Одновременное выполнение условий (2) и (3) в макропредставлении может быть сформулировано в виде

$$P_{сд} < S_H,$$

где  $P_{сд}$  — сдвигающее усилие в контакте;  $S_H$  — несущая способность контакта.

Несущая способность контакта  $S_H$  определяется как сумма молекулярной  $S_{мол}$  и механической  $S_{мех}$  составляющих:

$$S_H = S_{мол} + S_{мех}$$

и представляет собой полное значение силы трения, полученное на основе двухчленного закона трения [10, 14].

Молекулярная и механическая составляющие несущей способности контакта определяются согласно выражениям

$$T_{мол} \dot{S}_{мол} + S_{мол} = S_{мол \max};$$

$$S_{мех} = \mu N,$$

где  $T_{мол}$  — постоянная времени процесса адгезионного взаимодействия;  $S_{мол \max}$  — несущая способность контакта при полном насыщении молекулярных связей;  $\mu$  — коэффициент трения между контактирующими поверхностями;  $N$  — нормальное усилие в контакте.

Постоянная времени  $T_{мол}$  может быть упрощенно представлена выражением

$$T_{мол} = b/c,$$

где  $b$ ,  $c$  — коэффициенты диссипации и жесткости в реологическом элементе среды, прилегающей к поверхностям контакта [7, 10].

Анализ полученных результатов показывает, что динамическое контактирование не может рас-

сматриваться как механический процесс, связанный только с упругопластическими контактными деформациями, и для его адекватного описания необходимо рассматривать адгезионные процессы, которые протекают в условиях переменных нормальных контактных деформаций и скоростей скольжения, что позволяет говорить о закономерностях динамической адгезии в контактных соединениях. Это относится к контактными соединениям различного типа в условиях динамических нагрузок при малых и реверсивных перемещениях.

Система дифференциальных уравнений движения исследуемой технологической машины может быть записана в пространстве переменных состояния в виде

$$\dot{y} = Dy + S, \quad (4)$$

где  $y$  — вектор переменных состояния;  $D$  — матрица коэффициентов приведения;  $S$  — вектор возмущения.

В общей постановке элементы матрицы  $D$  и вектор-функции  $S$  в (4) являются кусочно-постоянными. Данное обстоятельство приводит к необходимости разработки специального алгоритма решения, в котором присутствует в качестве управляющей функция переключения [10].

На основе рассмотренного выше общего подхода разработаны модели кусочно-линейного типа для трех видов объектов исследования: поступательно перемещающихся исполнительных механизмов привода, замкнутых участков валопровода механизмов редукторного типа, технологических систем механической обработки.

В качестве примера рассмотрим динамику контактных взаимодействий при обработке резанием. Исследование фаз скольжения и схватывания при обработке резанием осуществлено на основе различных подходов [7, 11]. Взаимодействие режущего инструмента и заготовки в фазе скольжения рассматривается как взаимодействие твердых тел. При этом тангенциальная сила формируется на основе макропредставления как величина, пропорциональная нормальной составляющей силы резания. В фазе схватывания между подсистемами вводится элемент сплошной среды — стружка, который определяет условия взаимодействия между режущим инструментом и заготовкой. При этом контактное взаимодействие между стружкой и поверхностью режущего инструмента формируется на основе микропредставления и определяется несущей способностью контакта  $S_H$ . Под несущей способностью контакта понимается максимальное значение силы, обеспечивающей переход из фазы схватывания в фазу скольжения. Переход из одной фазы в другую формируется самой динамической системой путем последовательных фазовых переходов. Условия осуществления фазовых переходов определяются кинематическими и силовыми характеристиками взаимодействия подсистем.

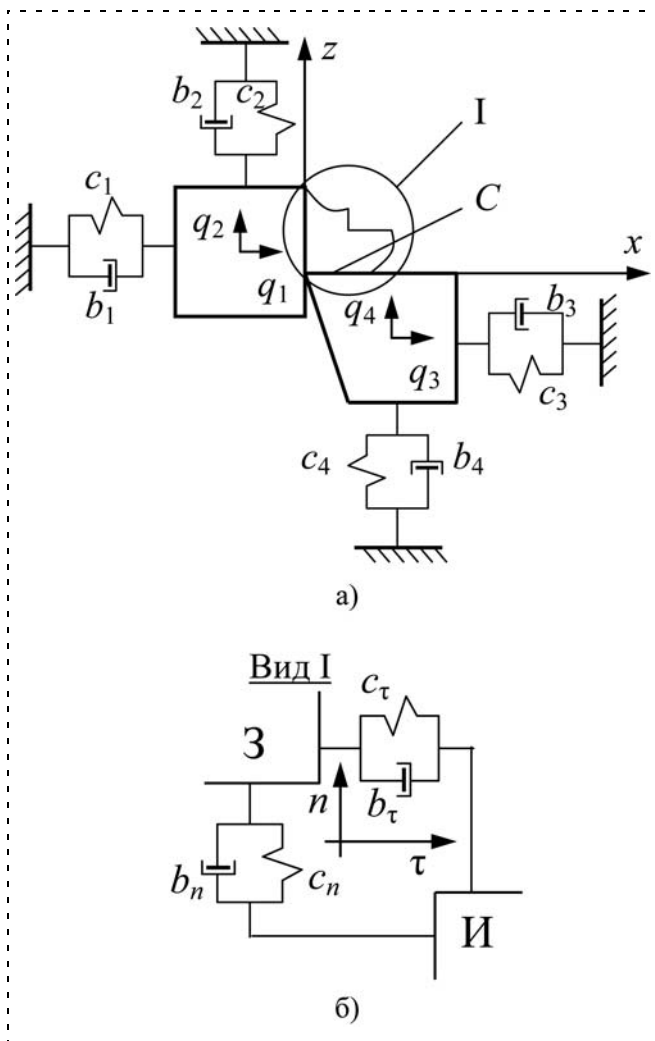


Рис. 2. Модельное представление динамики контактных взаимодействий при обработке резанием: а — четырехконтурная модель взаимодействия подсистем заготовки и режущего инструмента; б — реология контактных взаимодействий в зоне резания

Рассмотрена наиболее представительная модель технологической системы механической обработки (ТСМО) малой размерности, полученная в ограниченном частотном диапазоне при аппроксимации полной динамической модели ТСМО. Данной модели соответствуют четыре обобщенных координаты, причем она включает две подсистемы — подсистему заготовки с координатами  $q_1, q_2$  и подсистему инструмента с координатами  $q_3, q_4$  (рис. 2, а). Взаимодействие между подсистемами осуществляется в процессе резания и отображается двумя упруго-диссипативными элементами в касательном и нормальном направлениях с параметрами  $c_\tau, b_\tau$  и  $c_n, b_n$  (рис. 2, б).

Система дифференциальных уравнений состояния рассматриваемой модели является нелинейной вследствие нелинейности характеристик взаимодействия подсистем, так как исследуемый процесс представляет собой совокупность фаз скольжения и схватывания. В фазе скольжения поведение модели

описывается на основе традиционного подхода, например, с использованием постоянных запаздывания. При рассмотрении фазы схватывания для получения упруго-диссипативных характеристик необходимо выбрать вид реологической модели в зоне стружкообразования. Расчетно-экспериментальные исследования показали применимость для конструкционных материалов достаточно простых реологических моделей Фойхта и Максвелла [11].

Описание силового взаимодействия в каждой из указанных фаз осуществлено линеаризованными уравнениями, что дает возможность применить метод аппроксимации нелинейных характеристик кусочно-линейными функциями [10, 16]. В соответствии с данным методом, модифицированным для условий рассматриваемой задачи, система уравнений движения (4) модели ТСМО записана в виде системы дифференциальных уравнений с кусочно-постоянными коэффициентами. Вектор переменных состояния  $y$  имеет следующие компоненты:

$$y_1 = q_1; y_2 = \dot{q}_1; y_3 = q_2; y_4 = \dot{q}_2; y_5 = q_3; y_6 = \dot{q}_3; y_7 = q_4; y_8 = \dot{q}_4; y_9 = P_z; y_{10} = P_x; y_{11} = z_c; y_{12} = z_c, (5)$$

где  $q_1, q_2, q_3, q_4$  — обобщенные координаты модели;  $z_c, z_c$  — контактные деформации в зоне резания по осям  $x$  и  $z$  (зона С на рис. 2, а);  $P_x, P_z$  — составляющие силы резания по тем же осям.

Фазовые переходы формируют функцию переключения  $Sg(u)$ , принимающую значения 0 или 1 в зависимости от условий:

$$Sg(u) = \begin{cases} 0 & \text{при } u > V_k; \\ 1 & \text{при } u \leq V_k, \end{cases} (6)$$

где  $u$  — относительная скорость в контактом соединении сходящей стружки с передней поверхностью инструмента (зона С на рис. 2, а);  $u = V_C + y_6 - y_2$ ;  $V_C$  — скорость сходящей стружки;  $(y_6 - y_2)$  — относительная скорость перемещения подсистем заготовки и инструмента в направлении оси  $x$ ;  $V_k$  — критическая скорость, при которой начинают активно формироваться адгезионные связи.

Функция переключения  $Sg(u)$  в (6) принимает значение 0 в фазе скольжения и 1 — в фазе схватывания. В таблице представлены выражения для

Значения функции  $Sg(u)$  в режимах контактного взаимодействия

№	$U$	$y_{10}$	$Sg$	Режим
1	$>V_k$	$P_x(t)$	0	Скольжение
2	$=V_k, dV_\tau/dt < 0$	$>S_H$	0	Скольжение (переходной режим)
3	$=V_k, dV_\tau/dt < 0$	$<S_H$	1	Переход
4	$<V_k$	$<S_H$	1	Схватывание
5	$<V_k$	$>S_H$	1	Схватывание (переходной режим)
6	$=V_k, dV_\tau/dt > 0$	$<S_H$	1	Схватывание (переходной режим)
7	$=V_k, dV_\tau/dt > 0$	$>S_H$	0	Переход

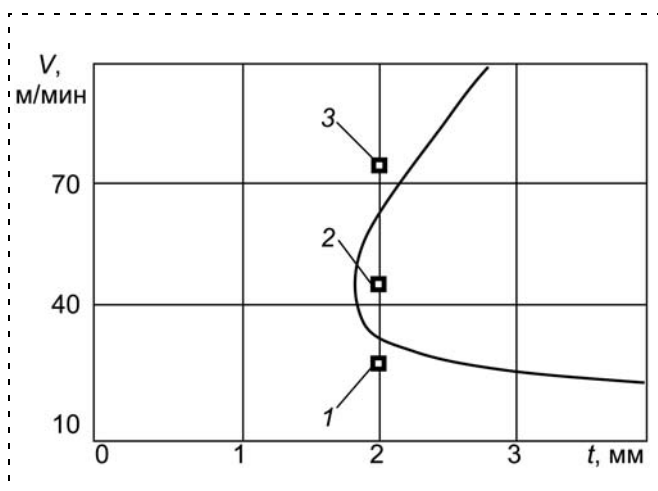


Рис. 3. Граница области устойчивости ТСМО:  
 1 —  $n = 120 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 —  $n = 250 \text{ мин}^{-1}$ ; 3 —  $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

функции  $Sg(u)$  в соответствующих режимах контактного взаимодействия. В выражении (6) условия переключения упрощены по сравнению с условиями (2)–(3), так как при обработке резанием условие (2) выполняется автоматически.

Молекулярно-механические процессы, протекающие при взаимодействии режущего инструмента и заготовки, могут быть описаны системой дифференциальных уравнений (4). Описание  $(12 \times 12)$ -матрицы  $D$  и  $(12 \times 1)$ -вектора  $S$  выполнено в работе [12].

Было осуществлено натурное моделирование обработки точением при следующих условиях. Заготовка: цилиндрическая, материал сталь 40Х, диаметр 60 мм. Резец: поперечные размеры  $25 \times 30$ , вылет 120 мм, главный угол в плане  $60^\circ$ , материал режущей части — твердый сплав Т5К10. Параметры обработки: рабочая подача  $S = 0,08 \text{ мм/об}$ , скорость резания  $V = 10 \dots 150 \text{ м/мин}$ , глубина резания

$t = 0,5 \dots 5 \text{ мм}$ . Для данных условий применительно к рассматриваемой модели была построена граница области устойчивости ТСМО в плоскости параметров глубина резания — скорость резания, представленная на рис. 3. Здесь же обозначены экспериментальные точки 1, 2 в области устойчивости и 3 — за границей области устойчивости при частоте вращения заготовки, соответственно: 1 —  $n = 120 \text{ мин}^{-1}$ ; 2 —  $n = 250 \text{ мин}^{-1}$ ; 3 —  $n = 400 \text{ мин}^{-1}$ .

На рис. 4 представлены сопоставительные расчетные и экспериментальные смещения в направлении оси  $x$ , которые адекватно отображают последовательность фаз скольжения и схватывания в процессе резания. По результатам имитационного моделирования на основе соответствующих методик решается задача управления параметрами обработки методом оптимизационного проектирования в целях обеспечения требуемого качества изготовления [10, 11, 15, 17].

Рассмотрим исходные предпосылки решения оптимизационной задачи по обеспечению стабильности качества изделий в ТСМО. При постановке задачи механической обработки устанавливаются ограничения по отдельным характеристикам качества. При нормировании состояния поверхностного слоя изделия, как правило, устанавли-

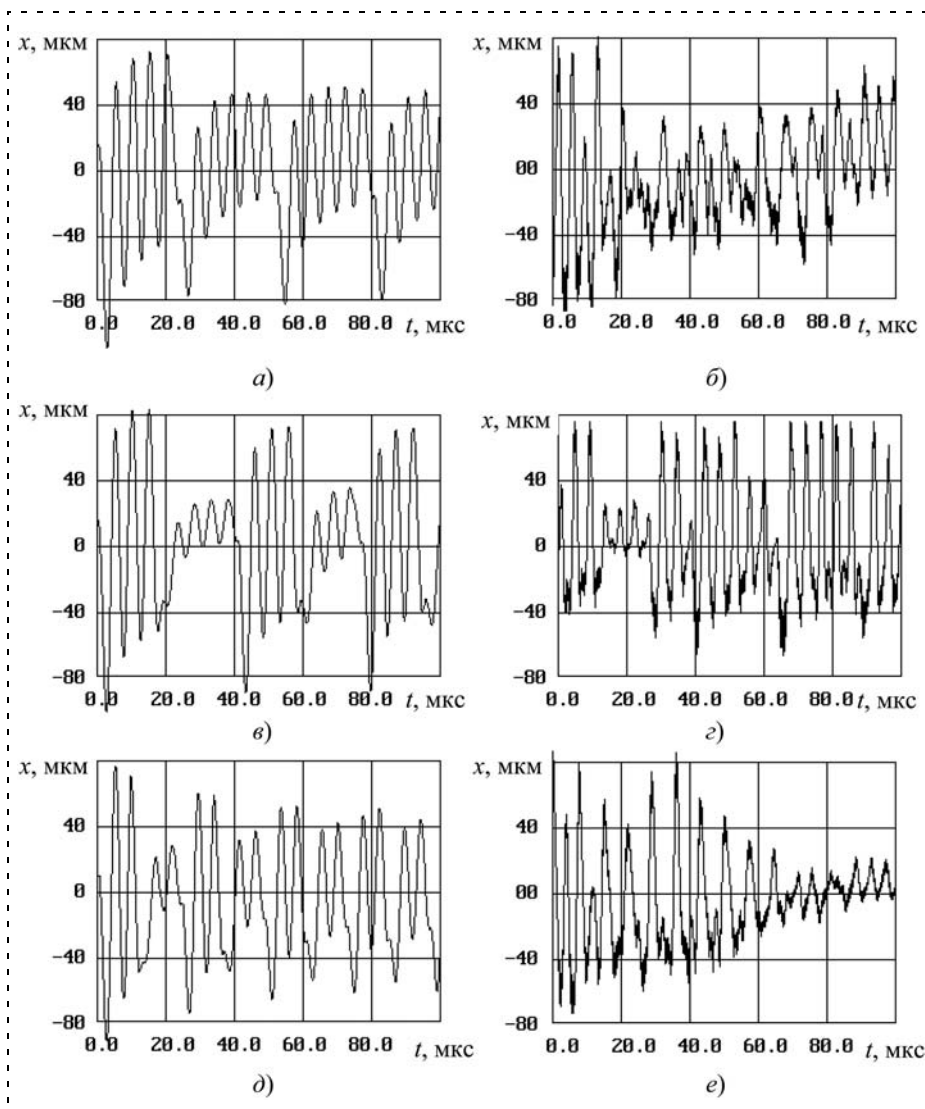


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные смещения в направлении оси  $x$ :  
 режим 1: а — расчет, б — эксперимент;  
 режим 2: в — расчет, г — эксперимент;  
 режим 3: д — расчет, е — эксперимент



ливают ограничения по отклонению размеров, шероховатости поверхности, твердости и остаточным напряжениям:

$$\delta \leq [\delta]; \quad (7)$$

$$Ra \leq [Ra]; \quad (8)$$

$$HV \in [HV^{(1)}, HV^{(2)}]; \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{п}} \in [\sigma_{\text{п}}^{(1)}, \sigma_{\text{п}}^{(2)}]; \quad (10)$$

$$h_o \in [h_o^{(1)}, h_o^{(2)}]; \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{пп}} \in [\sigma_{\text{пп}}^{(1)}, \sigma_{\text{пп}}^{(2)}]; \quad (12)$$

где  $\delta$ ,  $[\delta]$  — действительное и допустимое отклонения размеров;  $Ra$ ,  $[Ra]$  — действительное и допустимое значения шероховатости обработанной поверхности;  $HV$ ,  $HV^{(1)}$ ,  $HV^{(2)}$  — действительное, минимальное и максимальное допустимые значения твердости;  $\sigma_{\text{п}}$ ,  $h_o$ ,  $\sigma_{\text{пп}}$  — действительные поверхностное остаточное напряжение, глубина перехода знака эпюры напряжения, максимальное поверхностное остаточное напряжение, соответственно;  $\sigma_{\text{п}}^{(1)}$ ,  $\sigma_{\text{п}}^{(2)}$ ,  $h_o^{(1)}$ ,  $h_o^{(2)}$ ,  $\sigma_{\text{пп}}^{(1)}$ ,  $\sigma_{\text{пп}}^{(2)}$  — их минимальные и максимальные допустимые значения, соответственно.

В пространстве варьируемых параметров формируется область допустимых значений, ограниченная соответствующими функциями. В данной области обеспечивается стабильность качества поверхностного слоя изделия в пределах полей допусков при максимальной производительности обработки.

#### Список литературы

1. Верховский А. В. Явление предварительного смещения при трогании несмазанных поверхностей с места // Журнал техн. физики. 1926. № 3. С. 311.

2. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

3. Вейц В. Л. Исследование трения покоя в направляющих скольжения при низкочастотных направленных микроколебаниях. Новое в теории трения. М.: Наука, 1966. С. 60—82.

4. Максак В. И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта. М.: Наука, 1975. 60 с.

5. Вейц В. Л., Бундур М. С., Хитрик В. Э. Влияние эксплуатационных характеристик машин на динамические контактные свойства материалов // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. СПб.: Изд-во СЗПИ, 1993. С. 52—61.

6. Крагельский И. В. Влияние продолжительности неподвижного контакта на величину силы трения // ЖТФ. 1944. Т. 14. Вып. 45. С. 272.

7. Васильков Д. В., Максимов О. Г., Хитрик В. Э. Математическая модель контактных динамических взаимодействий упругой системы в процессе резания на базе молекулярно-механических представлений // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. Вып. 5. СПб.: Изд-во СЗПИ, 1997.

8. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.

9. Кудинов В. А., Толстой Д. М. Трение и колебания / Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х т. Т. 2. М.: Машиностроение, 1979. С. 11—22.

10. Васильков Д. В., Вейц В. Л., Шевченко В. С. Динамика технологической системы механической обработки. СПб.: Инструмент, 1997. 230 с.

11. Васильков Д. В., Кочина Т. Б. Теория и методы исследования контактных взаимодействий в технологических машинах на основе реологических представлений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 179 с.

12. Вейц В. Л., Васильков Д. В. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок // Станки и инструмент. 1999. № 6. С. 9—13.

13. Пуш В. Э. Малые перемещения в станках. М.: Машгиз, 1961. 351 с.

14. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Э. Д. Браун, Н. А. Буше, И. А. Буяновский и др. / Под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Центр "Наука и техника", 1995. 778 с.

15. Васильков Д. В., Кочура А. Е. Задачи динамического синтеза технологической системы механической обработки // Современное машиностроение. Сб. науч. тр. (приложение к журналу "Инструмент"). Вып. 1. СПб.: Инструмент, 1997.

16. Основы динамики и прочности машин / Под ред. В. Л. Вейца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 232 с.

17. Васильков Д. В., Козлова Е. Б. Применение интегрированного конечноэлементного комплекса COSMOS/M к решению задач термоупругопластичности // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. Вып. 4. СПб.: Изд-во СЗПИ, 1996. С. 122—130.

## ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)

состоится научно-техническая конференция

### Искусственный интеллект и управление" (ИИУ-2011).

#### Научные направления конференции:

- ◆ Интеллектуальный анализ данных
- ◆ Искусственный интеллект в управлении
- ◆ Системы принятия решений, планирования и моделирования
- ◆ Сетевые модели в искусственном интеллекте
- ◆ Компьютерная обработка естественно-языковых текстов и семантический поиск
- ◆ Автоматизация научных исследований и управление знаниями
- ◆ Обучающие и экспертные системы
- ◆ Прикладные интеллектуальные системы

Дополнительные материалы по конференции ИИУ-2011 см. на сайте Института проблем управления РАН

## **Подготовка кадров и научно-техническое сотрудничество между ГНЦ РФ ЦНИИ робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК) и кафедрой "Мехатроника и робототехника" БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова**

Более 25 лет практически, а с 2003 года — и юридически осуществляется взаимосвязь ЦНИИ РТК и кафедры по многим направлениям учебной и научной работы.

С 2003 г. действует договор между ЦНИИ РТК и БГТУ "Военмех", где четко и конкретно обозначены все обязательства сторон. ЦНИИ РТК, являясь головным предприятием для кафедры, безвозмездно проводит различные учебные практики для студентов; ежегодно направляет специалистов на обучение в докторантуру и заочную и очную аспирантуру БГТУ (по кафедре); формирует заявки на целевую подготовку инженеров по тематике ЦНИИ; совместно организует научно-технические конференции и семинары; привлекает специалистов кафедры к выполнению НИОКР; обеспечивает совместно с сотрудниками кафедры постановку и организацию учебной научно-лабораторной базы кафедры.

Особенностью является высокий процент наукоемких НИОКР и "чистых" ОКР, причем по достаточно широкой тематике — от задач космической робототехники до задач атомной энергетики, включая спецтематику для МВД, ФСБ, МО. У нас совместно разработана так называемая "подготовка научных кадров через учебный процесс". Принципиально здесь ничего нового нет, однако на протяжении более чем 10 лет применения этой методики мы получаем хорошие результаты. Практически все отобранные способные студенты в середине

4-го курса по рекомендациям кафедры командированы на предприятие и распределяются по тематическим группам, где они включаются в работу по свободному графику. Все дипломные проекты и работы этих студентов, а также многие курсовые работы и курсовые проекты выполняются только по реальным, требуемым ЦНИИ, тематикам. Руководят этими проектами обычно преподаватели кафедры.

За год с небольшим у студентов появляется возможность проявить свои способности и возможности и показать свою "полезность" предприятию. Далее чаще всего продолжается обучение и оформляется заочная аспирантура. На сегодняшний день подготовлены более 20 докладов и статей на Всесоюзных НТК со студентами (профессор + студент), защитили диссертации два кандидата технических наук, проходят обучение в аспирантуре шесть человек, в докторантуре — один. Только за последние 5 лет более десяти выпускников стали сотрудниками предприятия. Сейчас около 20 студентов и дипломников работают в ЦНИИ и учатся. Таким образом, проблема молодых кадров по таким наукоемким специальностям, как "мехатроника" и "робототехника" для отделения ЦНИИ РТК, руководимого А. В. Полиным, решается успешно. При этом повышается и квалификационный, и научный уровень сотрудников кафедры.

В этом номере журнала представлены две статьи от ЦНИИ РТК, одна из которых (авторы — В. А. Лопота и др.) подводит промежуточный итог работы ЦНИИ по космической тематике, а в другой (автор — Е. И. Юревич) обсуждаются фундаментальные задачи робототехники.

Мы с оптимизмом смотрим в будущее, несмотря на негативное отношение к прикладной науке руководства нашей страны сегодня и весьма низкий уровень оценки труда и научных работников, и преподавателей вузов.

Ответственные за договор от ЦНИИ РТК — зам. главного конструктора А. В. Полин, от БГТУ "Военмех" — профессор А. М. Потапов.

**С. Г. Герман-Галкин**, д-р техн. наук, проф.,  
**Ю. В. Загашвили**, д-р техн. наук, проф.,  
первый проректор — проректор по научной  
и инновационной деятельности, зав. каф.,  
**М. С. Клещенко**, инженер,  
БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург  
germangalkin@gmail.com  
y.zagashvili@mail.ru  
maxonbgtu@yandex.ru

## Концепция дистанционного обучения на кафедре "Мехатроника и робототехника"

*Описан опыт проведения дистанционного обучения на кафедре. Представлен план дальнейшего развития и усовершенствования методов дистанционного обучения по направлению "Мехатроника и робототехника".*

**Ключевые слова:** LMS Moodle, дистанционное обучение, модели мехатронной системы, обучение по сети Интернет, система дистанционного обучения

### Введение

Дистанционное обучение (ДО) определяется как форма организации учебного процесса с использованием сетевых технологий, которая обеспечивает интерактивное взаимодействие удаленных участников образовательного процесса через открытые каналы доступа.

Основными целями кафедры при организации дистанционного обучения являются:

- интенсификация преподавательского ресурса;
- сохранение и тиражирование педагогического опыта и знаний;
- охват новых сегментов рынка образовательных услуг;
- создание специализированного учебного центра инновационного образования.

Ключевыми в определении дистанционной формы обучения являются понятия "*интерактивное взаимодействие*" и "*взаимодействие через открытые каналы доступа*".

*Свойство интерактивности* выражается в том, что в процессе обучения пользователь постоянно получает "реакцию" на свои действия со стороны системы, обеспечивающей проведение дистанционного обучения, и/или преподавателя.

*Взаимодействие через открытые каналы доступа* выражается в потенциальной возможности прохождения обучения любым пользователем, имеющим подключение к сети Интернет в любое время и в любом месте.

Для реализации ДО необходимо иметь достаточно мощный сервер с быстрыми каналами связи. На этом сервере необходима инсталляция специализированного программного обеспечения (LMS-Learning Management System), позволяющего управлять процессом ДО.

Для создания курсов ДО университет должен иметь специальную авторскую программу (программы), способную создавать совместимый с выбранной LMS контент или разрабатывать учебный материал в форматах, поддерживаемых большинством LMS.

Названное аппаратное и программное обеспечение для реализации ДО требует значительных материальных затрат. Поэтому можно пойти по пути аренды подходящего сервера и программного обеспечения. Такие предложения широко рекламируются в сети Интернет. Но на сегодняшний день большинство учебных заведений имеют в своем распоряжении собственные или арендованные веб-серверы, на которых можно установить бесплатно распространяемые LMS с открытым кодом.

Существующее программное обеспечение для организации ДО, в основном, ориентировано на реализацию гуманитарного образования и не предоставляет возможность проведения лабораторных работ по техническим дисциплинам. Эти лабораторные работы могут быть реализованы как с использованием удаленного доступа к реальным лабораторным установкам, так и с использованием виртуальных лабораторий. Оба перечисленных способа требуют разработки специализированного программного обеспечения, позволяющего интегрировать эти лаборатории с системой LMS.

Следует также подчеркнуть, что курсы ДО плохо вписываются в существующие технологии обучения и администрирования, принятые в университетах, по следующим причинам: во-первых, отсутствует методика расчета часовой нагрузки для ДО (это касается как преподавателя, так и студента). Во-вторых, ДО требует наличия специальной административной единицы — деканата ДО, которую сложно вписать в существующую административную структуру университета.

Все перечисленные трудности создания ДО в существующем техническом университете косвенно подтверждаются тем обстоятельством, что такие университеты имеют на своих серверах только так называемые электронные учебники, которые служат вспомогательным материалом для осуществления традиционного обучения.

В связи с изложенным на первом этапе разработки курса ДО на кафедре "Мехатроника и робототехника" принята концепция, которая опирается на технологию заочного обучения, организация которого в технических университетах достаточно хорошо отработана и проверена практикой.

## Сайт дистанционного обучения "Моделирование в мехатронике"

Проект сайта ДО по курсу "Моделирование в мехатронике" разработан для студентов выпускного курса Балтийского государственного технического университета "Военмех".

Сайт реализован в пакете Front Page и содержит следующие разделы (рис. 1):

1. Лекционно-практический материал.
2. Виртуальные лабораторные работы.
3. Ведомость успеваемости.
4. Форум.

5. Блок регистрации для реализации ограниченного доступа.

6. Счетчик времени, проведенного на сайте студентами и преподавателем.

Последние три раздела обеспечиваются сервером, на который загружается сайт ДО.

Лекционно-практический материал включает 30 лекций в восьми разделах (рис. 2). Лабораторный практикум состоит из 11 виртуальных лабораторных работ (рис. 3).

Оба эти раздела снабжены многочисленными моделями, реализованными в среде MATLAB-Simulink.

Управление обучением осуществляется преподавателем по сети Интернет с организацией обычных консультаций, зачета и экзамена. Файлы с моделями не размещаются на сервере, они пересылаются студенту по его запросу, что позволяет преподавателю отслеживать работу студента. *Лабораторные работы подлежат обязательному выполнению в объемах и в сроки, установленные преподавателем.*

При такой организации ДО отпадает необходимость в дорогостоящем программном обеспечении и в создании специальных организационных структур в действующем университете. При этом не нарушается "живая" связь между преподавателем и студентом.

## Вопросы разработки моделей мехатронных систем

В общем случае мехатронная система включает три подсистемы: информационную, энергоэлектронную и электромеханическую. Мехатронная система, как правило, является нелинейной, импульсной системой с дискретно изменяющимися параметрами. При изучении мехатронной системы необходимо исследовать динамические, статические, энергетические, спектральные и ряд других характеристик. Поэтому ее анализ, а также синтез системы управления требует применения методов, базирующихся на современных компьютерных технологиях.

Создание обучающих программ с применением современных компьютерных технологий для рассматриваемого курса наиболее полно

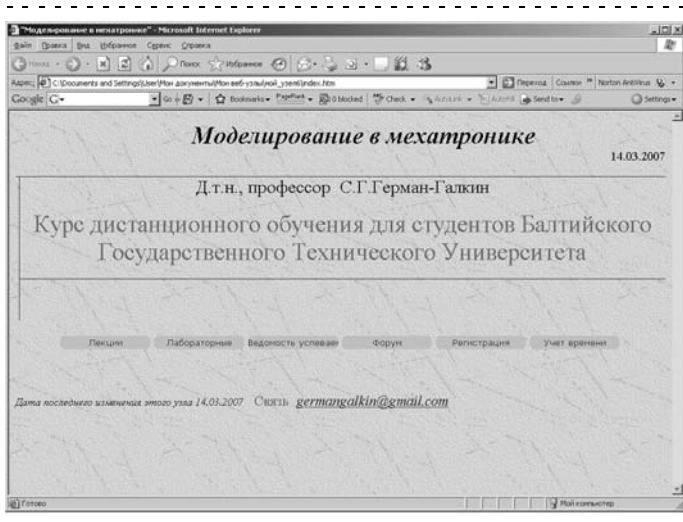


Рис. 1. Сайт дистанционного обучения

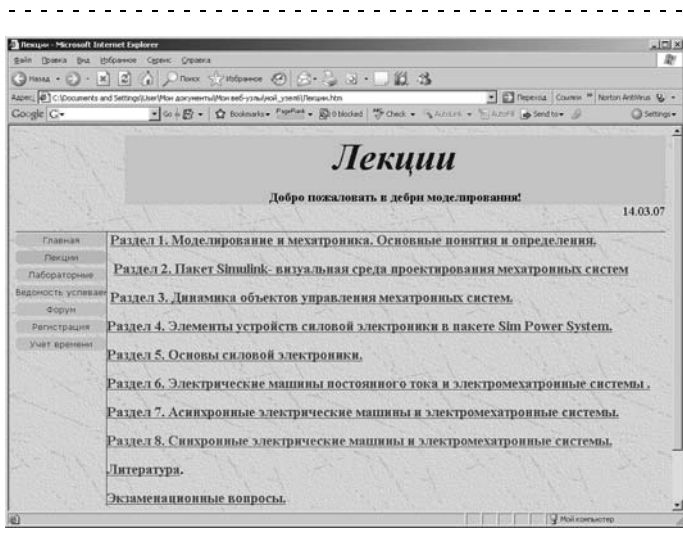


Рис. 2. Лекционно-практический материал сайта

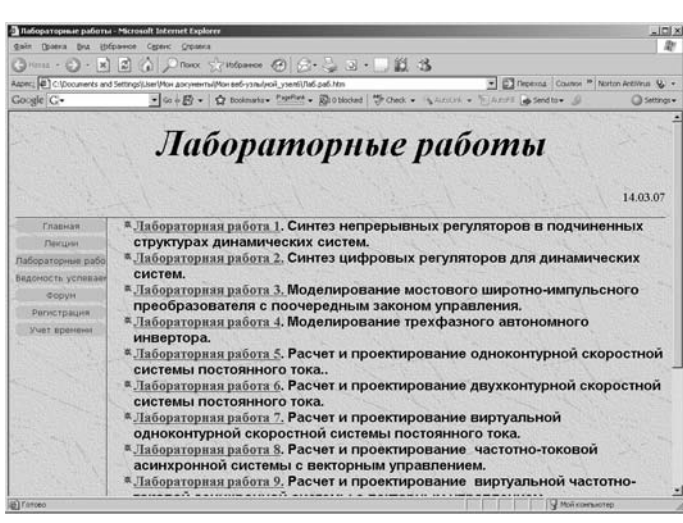


Рис. 3. Лабораторные работы сайта

реализуются в среде MATLAB-Simulink. При этом компьютерные модели в зависимости от решаемой задачи можно поделить на несколько уровней:

1. Уровень, использующий рабочее пространство MATLAB и его расширений (Toolboxes).

2. Структурный уровень, базирующийся на математическом описании и использующий структурные блоки пакета Simulink и его расширений (Blocksets).

3. Функциональный уровень, базирующийся на логике работы системы и использующий блоки пакета Simulink и его расширений (Blocksets).

4. Виртуальный уровень, использующий маскированные блоки пакета Sim Power System.

5. Имитационные лабораторные стенды, которые разрабатываются с использованием графического интерфейса пользователя (GUI).

*Структурные модели* строятся на основе математического описания динамических систем. При этом энергоэлектронная подсистема (импульсная часть системы) описывается непрерывным звеном (безынерционным, апериодическим, звеном запаздывания). Информационная подсистема (цифровая часть системы) первоначально представляется также непрерывным звеном, которое описывается дифференциальным уравнением, передаточной функцией, нулями и полюсами передаточной функции или уравнениями пространства состояний. В пакете Simulink имеется полный набор блоков, позволяющих реализовать любую структурную модель. Замена импульсной и цифровой частей эквивалентными непрерывными блоками позволяет получить динамические характеристики, которые можно рассматривать как эталонные. В дальнейшем при переоборудовании информационной непрерывной части в цифровую, а энергоэлектронной части в импульсную проверяется влияние этих частей на динамику всей системы.

Представление результатов моделирования структурных моделей осуществляется при использовании пакета расширения Control System, который в своем составе имеет инструментальное средство LTI-Viewer.

Основой *функциональной модели* является логика работы устройства, которое, как правило, содержит нелинейные элементы. Функциональные модели используются для моделирования элементов силовой электроники, при исследовании динамики систем, представленных структурными моделями. В этом случае отпадает необходимость в замене силового преобразователя эквивалентным апериодическим звеном или звеном запаздывания.

*Виртуальные модели* — это маскированные блоки устройств силовой электроники и электромеханики, помещенные в библиотеки пакета расширения Sim Power System. Использование виртуальных моделей при исследовании динамики мехатронных систем позволяет сравнить их со структурными моделями и показать студенту возможности среды MATLAB-Simulink в проектировании систем. Пред-

ставление результатов моделирования этих моделей осуществляется также путем записи результатов моделирования в рабочее пространство MATLAB с их последующей программной обработкой.

*Имитационный лабораторный стенд* представляет собой проект, состоящий из значительного числа взаимосвязанных файлов, разработанных в среде MATLAB-Simulink с использованием графического интерфейса пользователя.

Разработка имитационного лабораторного стенда требует много времени, но значительно облегчает выполнение лабораторной работы студента. Такие стенды полностью имитируют реальные лабораторные установки и могут быть рекомендованы в курсах, где не требуется изучения вопросов моделирования.

### **Концепция дальнейшего развития дистанционного обучения**

Основными направлениями развития ДО на кафедре Н1 "Мехатроника и робототехника" БГТУ являются:

1. Организация ДО на базе LMS Moodle [7], так как это позволяет значительно расширить возможности ДО и упростить создание электронных курсов. Эта система является широко используемой в мире и распространяется бесплатно. Стоит отметить, что проект LMS Moodle стартовал в 90-х годах и на сегодняшний день переведен на десятки языков, в том числе и на русский, применяется почти в пятидесяти тысячах организаций из более чем 200 стран мира. Большое сообщество пользователей Moodle постоянно обновляет функциональность системы и добавляет новые возможности ДО. Учитывая вышеизложенное, было решено осуществить перевод сайта ДО "Моделирование в мехатронике" в электронный курс под управлением LMS Moodle.

2. В рамках организации ДО на базе LMS Moodle планируется:

- упростить административные задачи, такие как: ведение ведомости успеваемости, запись студентов на курс и формирование групп, сбор статистической информации;
- упростить расширение курса и добавление нового методического материала;
- улучшить навигацию по материалам курса;
- сделать более удобным механизм общения преподавателя со студентами курса;
- сформировать автоматизированную выдачу и прием контрольных заданий.

3. Создание на сайте ДО под управлением LMS Moodle базовых электронных курсов по специальности кафедры.

4. Разработка серверного программного обеспечения для интерактивного проведения виртуальных лабораторных работ в среде MatLAB-Simulink.

5. Организация ряда удаленных лабораторных работ (выполнение лабораторных работ на реаль-

ном стенде через сеть Интернет) с приводами тахоп motor путем разработки специализированного серверного программного обеспечения, которое позволит организовать удаленный доступ к лабораторному стенду и согласовать его работу с LMS Moodle. Так как контроллеры движения тахоп motor сопряжены с программой Lab VIEW, установленной в лаборатории, значительно сократить время разработки удаленного доступа к лабораторному стенду можно с помощью модулей Internet Toolkit и Remote Panels данной программы [8]. Применение указанных модулей поможет в короткие сроки организовать удаленный доступ к лабораторному стенду через веб-интерфейс, исключив при этом стадию программирования. Таким образом, основная задача разработки удаленных лабораторных работ заключается в сопряжении системы дистанционного обучения с сервером на базе Lab VIEW путем создания модуля расширения для LMS Moodle. Основными задачами модуля сопряжения должны быть:

- контроль доступа пользователей ДО к лабораторному стенду;
- составление расписания доступа к лабораторному стенду и запись пользователей на проведение лабораторных и исследовательских работ;
- сохранение результатов экспериментов, проведенных в ходе лабораторных работ;
- ведение статистики.

6. Расширение контингента обучающихся с включением студентов родственных кафедр технических университетов Санкт-Петербурга и молодых специалистов курсов повышения квалификации.

### Заключение

Рассмотренный курс ДО "Моделирование в мехатронике" реализуется в БГТУ "Военмех" с 2007—2008 учебного года. Накопленный опыт работы с системой ДО позволяет сделать следующие выводы:

1. Студенты охотно работают в среде MATLAB-Simulink и общаются с преподавателем посредством сети Интернет.

2. Разработка и отладка одной модели по представленному образцу и проведение модельного эксперимента с получением требуемых характеристик занимают у студента в среднем четыре академических часа.

3. Взаимодействие со студентами посредством сети Интернет (пересылка файлов, пояснения и консультации) занимают у преподавателя приблизительно 0,5 академического часа на одного студента по одной лабораторной работе.

При рассмотренном подходе к организации ДО затраты университета минимальны, однако при этом планируемая почасовая нагрузка на преподавателя особенно при большом числе студентов должна быть значительно увеличена по сравнению с аналогичным традиционным курсом обучения. В дальнейшем на ученом совете планируется принять решение об официальном использовании ДО преподавателями кафедры "Мехатроника и робототехника".

### Список литературы

1. Хортон У., Хортон К. Электронное обучение: инструменты и технологии. М.: КУДИЗ-ОБРАЗ, 2005. 640 с.
2. Гуляев А. К. Macromedia AUTHORWARE 6.0. Разработка мультимедийных учебных курсов. СПб.: Корона принт, 2002. 399 с.
3. Герман-Галкин С. Г. Некоторые вопросы создания компьютерных обучающих курсов электротехнического цикла // Exponenta pro. 2003. № 1.
4. German-Galkin S., Marciniak R. Technologie komputerowe w dziedzinie nauczania zdalnego z elektrotechniki // Materiały i Technologie w Elektrotechnice-MITEL—2006. Gorzów Wlkp. 2006.
5. Гуляев А. К. Web-дизайн от Macromedia. Flash 5.0. С-Пб.: Корона принт, 2002. 475 с.
6. Создание Web-страниц и Web-сайтов. Самоучитель / Под ред. В. Б. Комягина, В. Н. Печникова. М.: Триумф, 2002. 490 с.
7. Сообщество пользователей MATLAB и Simulink. URL: <http://matlab.exponenta.ru/>.
8. William Rice, Susan Smith Nash. Moodle 1.9 Teaching Techniques. Olton: Packt Publishing, 2010. 195 p.
9. Distance-Learning Remote Laboratories using LabVIEW. URL: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3301>.

## ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011) состоится научно-техническая конференция

### "Мехатроника и эргатические системы" (МЭС-2011).

Научные направления конференции:

- ♦ АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ
- ♦ АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- ♦ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- ♦ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Дополнительные материалы по конференции МАУ-2011 см. на сайте журнала "Мехатроника, автоматизация управление"

# CONTENTS

**Yurevich E. I.** Fundamental Problems of Robotic Technology . . . . . 2

*It is shown that the modern robotic technology is one of important directions of development of ideas of the cybernetics, one of polygons of their working off and practical implementation. Fundamental tasks of robotic technology are considered: creation of "reasonable" robots by a self-organizing method, miniaturization and reconfigurability of robots, integration and optimization of their interaction with people.*

**Keywords:** cybernetics and robotic technology, "reasonable" robots, miniaturization and reconfigurability of robots

**Lopota V. A., Potapov A. M., Gradovtsev A. A., Kargov A. I., Daljaev I. Yu.** Transport-Manipulation System for ISS Maintenance and for Astronauts Supporting in Extra-Vehicular Activity. . . . . 6

*The article describes results of the preliminary research completed in CNII RTC concerning development of transport-manipulation system (TMS) intended for astronauts technical supporting in extra-vehicular activity on the International Space Station (ISS). During the research the appearance of TMS was elaborated, computer models of certain units and TMS as a whole were built, the system structure and functioning principles were defined, draft design documentation of TMS units was worked out, test mockups of certain units were manufactured. The space experiment is planned to perform.*

*Unlike the robotic systems working on the ISS today, TMS being developed is multifunctional and combines transport and manipulation functions, which will allow TMS to perform the wide range of job on the outer surface of the ISS.*

**Keywords:** transport-manipulation system, space robotics, International Space Station, extravehicular activity, robotic system, robot, manipulator, cosmic experiment

**Nemtsev E. M.** QNX Platform Application for Discrete-Time Adaptive Neural Network Control of PUMA-560 Actuators. . . . . 17

*This paper presents a universal adaptive discrete-time neural network algorithm implementation for PUMA-560 robot-manipulator actuators control in QNX Neutrino real-time operating system. Personal computer is used for control estimation. Neural network based control algorithm presented doesn't need the initial learning phase and net weights are updated on-line every time step.*

**Keywords:** QNX Neutrino, neural networks, robot manipulator control, real-time control

**Alexandrov V. V., Kuleshov S. V.** Digital Programmed Technology for Robotic Complexes Control . . . . . 21

*This paper considers key aspects of a programmed technology concept usage in development of control systems for robotic complexes. The perspective development directions are highlighted: programmed radio channel, unified communication platform, surrounding environment virtualization and the number of others.*

**Keywords:** robotic complex, digital programmed technology, the concept of simulation, environment virtualization, software defined radio

**Novosyolov B. V.** New Approaches to Designing of Vary-Drives . . . . . 25

*Supplementary guidelines to classical recommendations on designing of vary-drives (VD) for the problems of systems and circuit engineering are expounded. It is shown that the vary-drives design should have a comprehensive approach providing the optimal combination, interaction and interpenetration of all components of complex, in which the vary-drives are entered.*

**Keywords:** vary-drives, designing phases, integration and interpenetration of components, designing comprehensive approach

**Sharovатов V. T., Loshitskiy P. A.** Mathematical Model of the Power Pneumocylinder Without a Rod of Single Action Membrane Type . . . . . 30

*The mathematical model of the power pneumocylinder without a rod of single action, membrane type, considering properties of the compressed gas is offered. In research the basic equations gas-dynamics, describing behaviour of the compressed gas which have undergone to simplification and linearization taking into account experience of engineering practice are used. Results of experiment and a settlement example are resulted. A scope of the power pneumocylinder without a rod of single action membrane type — high-precision and high-speed control systems of different function.*

**Keywords:** a power element membrane type, gas processes, a working point, mathematical model, rate of gas flow, the pneumocylinder

**Korshunov A. I.** Synchronous Motor with Permanent Magnet on Rotor Frequency Setting into Operation . . . . . 37

*Synchronous motor's the constant acceleration frequency setting into operation in the cases of no load work and constant moment load is considered. Constant acceleration start steady-state area is determined in the phase plane. The motor's rotor lagging behind stator's field is laid aside phase plane abscissa axis.*

**Keywords:** synchronous motor with permanent magnet on rotor, frequency setting into operation

- German-Galkin S. G., Bormotov A. V.** Current State and Prospects of Development of Mechatronic Systems with Switched Reluctance Drives. . . . . 43  
*The most promising design and technological solutions to create switched reluctance electric machines (SREM), discusses their advantages and disadvantages. Methods for the construction and application of mechatronic systems (MS) on the basis VIEM by magnetolectric and electromagnetic stimulation, self-excited. The models of MS and the results of their work*  
**Keywords:** switched reluctance electric machines, mechatronic systems, technology, construction, machine-switching magnetic flux, the computer model
- Potapov A. M., Guschin M. A.** About Communication of Indicators of Quality of Automatic Control Systems in Time, Frequency and Root Areas. . . . . 50  
*Analytical correlation of indicators of quality of automatic control systems in time, frequency and complex areas generally and for structures typical normalized characteristic equations with the maximum degree of stability are resulted. Examples are given.*  
**Keywords:** quality indicators, stability margins
- Kulik V. I., Kulik A. V., Zagashvili Yu. V., Orischenko A. S.** Modelling of Gas-Phase Production of Composites with Carbon or Ceramic Matrices . . . . . 54  
*An original mathematical model is considered in this paper. The model allows simulation of different modifications of Chemical Vapour Infiltration (CVI) process. To simulate operation of CVI reactor, a software package was developed basing on this model. The package describes conjugated heat and mass transport in the whole reactor within 2D approach. It also includes 1D models of mass transport in porous media to describe evolution of densified preform. The simulation results of production of composites with carbon and silicon carbide matrix by isothermal CVI are presented in the paper.*  
**Keywords:** composite materials with ceramic or carbon matrix, Chemical Vapour Infiltration (CVI), porous media, numerical modelling, heat and mass transport, control of technological processes
- Korotkov Ye. B., Levinzon G. L., Moroz A. V.** Stabilization and Absorbing of Vibration of Equipment for Nanotechnologies. . . . . 61  
*Here we consider a unique active pneumatic absorbing suspension meant for isolation of a platform with precision processing equipment and a positioning coordinate worktable from base vibrations and for stabilization of the platform position in the suspension when the platform is being disturbed by moving links of the coordinate table. It is recommended to use the algorithm of complex control for the drive system of pneumatic mountings of the suspension which ensures effective attitude stabilization and active absorbing of vibration for the platform.*  
**Keywords:** load carrying platform, coordinate worktable, vibrating base, pneumatic absorbing active mounting, force impact on the platform in four-bearing suspension, control for drive system of pneumatic mountings
- Vasilkov D. V., Kochina T. B., Aleksandrov A. S.** The Account of Contact Interactions in Mobile and Motionless Connections of Links of Technological Cars in Dynamics and Management Problems. . . . . 68  
*Features of contact dynamic interactions in technological cars for the decision of problems of management for the purpose of maintenance of demanded dynamic qualities are considered. As an example the technological system of machining is considered.*  
**Keywords:** contact, interaction, dynamics, management, cutting, quality
- German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Kleshchenko M. S.** Concept of E-Learning at Mechatronics and Robotics Department. . . . . 75  
*In the article describe experience of e-learning at Mechatronics and Robotics department and presented the plan of future development and improvement of e-learning process.*  
**Keywords:** e-Learning, Learning Management System (LMS), Mechatronic system models, LMS Moodle

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

---

Сдано в набор 01.12.2010. Подписано в печать 24.01.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
 Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,68. Заказ 66. Цена договорная.

---

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,  
 телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15