

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 6 (99)

ИЮНЬ

2009

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.
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.
РАССАДКИН Ю. И.
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.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАТРОНИКИ, ИНФОРМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ*

Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики	2
Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Роль и место некибернетики в современной структуре системы знаний	11
Кузнецов Н. А., Гречишкина Н. А. Системы управления нанообъектами	22
Каляев И. А., Капустян С. Г. Проблемы группового управления роботами	33
Краснова С. А., Уткин В. А., Уткин А. В. Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности	41
Яковис Л. М., Спорягин К. В. Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления	55
Леонов Г. А., Кондратьева Н. В. Электромеханические и математические модели синхронных электрических машин	64
Евстифеев М. И. Проблемы проектирования и опыт разработки микромеханических гироскопов	70
К Юбилею академика РАН В. Г. Пешехонова	77
К Юбилею Б. Г. Ильясова.	78
Contents	79

* Выпуск данного номера поддержан грантом РФФИ № 08-08-06065 "Организация и проведение 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления"

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

УДК 621.865.8; 382.049.77 (075.8)

Е. Д. Теряев¹, член-корр. РАН, проф.,
Н. Б. Филимонов², канд. техн. наук, доц.,
К. В. Петрин¹, зав. лаб.,

¹ ИМАШ им. акад. А. А. Благонравова РАН,

² МГУПИ, Москва,

e-mail: mech@novtex.ru

Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики

Анализируются современные трактовки понятия и эволюция представлений о предметной области мехатроники. Показано, что мехатронику целесообразно рассматривать как компьютерную парадигму развития технической кибернетики.

Ключевые слова: мехатроника, понятие и предметная область, парадигмы в науке, эволюция кибернетики, информатика, техническая кибернетика.

"Новая наука в своем развитии как бы проходит три стадии: романтического увлечения, отрезвления и практического применения и затем нового увлечения, но уже основанного на базе реального понимания предмета и путей его развития".

В. Д. Пекелис

Кибернетика:

Неограниченные возможности
и возможные ограничения.

Перспективы развития.

Мехатроника и научно-технический прогресс

Научно-технический прогресс породил техносферу — совокупность созданных человечеством технических средств для обеспечения жизнедеятельности людей на планете. Согласно существующим прогнозам, в ближайшем будущем наряду с информатикой и биоинженерией революционизирующее влияние на развитие техносферы окажет мехатроника [1], представляющая собой область научно-технического знания и инженерной деятельности, интегрирующая механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования существующего и создания нового поколения техники и технологий.

Несмотря на то, что мехатроника является одной из самых молодых областей технической науки XX века, можно констатировать, что уже в настоящее время происходит мехатронизация техносферы [1, 2], связанная с решительным поворотом развития производственной и бытовой техносферы в направлении все более широкого внедрения мехатронных средств автоматизации. Дело в том, что основным содержанием развития человечества на современном этапе считается переход от индустриального к информационному обществу, в котором определяющая роль принадлежит информационным технологиям. Однако следует признать, что информационные технологии, являясь катализатором развития и прогресса, представляют собой лишь оболочку, которая при решении конкретных практических задач приобретает предметное наполнение. В последнее десятилетие в инженерной практике в качестве такого предметного наполнителя все чаще выступают мехатронные системы и технологии, которые призваны определить облик техносферы XXI века.

За время своего сравнительно непродолжительного существования мехатроника проникла во все сферы человеческой деятельности. В промышленно развитых странах она является приоритетным направлением развития науки и техники, определяющим уровень производства, конкурентоспособность продукции, качество жизни, обороноспособность и безопасность государства. Мехатроника демонстрирует яркий пример впечатляющих итогов междисциплинарного взаимодействия, причем наибольшее применение достижения мехатроники находят в таких отраслях машино- и приборостроения, как станко- и автомобилестроение, робототехника и вычислительная техника, а также авиакосмическая, медицинская, офисная и бытовая техника.

Как для любой фундаментальной естественной науки, для мехатроники характерно проявление всех трех, тесно переплетенных, этапов ее развития: классического, неклассического и постнеклассического [3]. Здесь имеется в виду, что классическая наука сначала в результате третьей научной революции, связанной со становлением неклассического естествознания, приобрела "неклассический характер", а затем в результате четвертой научной

революции, связанной с переходом от механических и электрических к микроэлектронным средствам обработки информации, приобрела "постнеклассический характер". На современном постнеклассическом этапе развития мехатроники возникла настоятельная необходимость осмысления ее места в системе научных и технических знаний.

Действительно, мехатроника находится в стадии активного развития: проводятся конференции и совещания по актуальным проблемам мехатроники, устраиваются выставки и презентации новых образцов мехатронной техники, успешно функционируют производственные и инновационные организации мехатронного профиля, ведется подготовка специалистов и защищаются диссертации по мехатронике, издается соответствующая монографическая и учебная литература. Однако, несмотря на широкое признание, дискуссионными остаются многие философские и научно-методические аспекты мехатроники. В литературе высказываются весьма различные и часто противоречивые точки зрения не только на содержание ее базовых понятий, но и на внутренние границы ее применимости. Общепринятого определения мехатроники, равно как и общепринятого представления о ее предмете до сих пор нет. В настоящей статье, отражающей позицию единственного отечественного периодического издания в области мехатроники — журнала "Мехатроника, автоматизация, управление", следующий номер которого является юбилейным (сотым), обсуждаются как современные трактовки понятия мехатроники, так и эволюция взглядов на ее предметную область.

Парадигмальный анализ развития науки

Одним из универсальных гносеологических инструментов раскрытия механизма эволюции науки (анализа движения научного знания) является *парадигмальный подход*, основанный на модели развития науки Куна (Т. S. Kuhn) [4], ядро которой составляет система четырех взаимосвязанных понятий: "парадигма", "научное сообщество", "нормальная наука" и "научная революция". Центральным в данной модели является понятие парадигмы, имеющее глубокие корни, введенное в научный обиход Бергманом (G. Bergman) и получившее статус научной категории благодаря знаменитой работе Куна [5].

В современной интерпретации термин "*парадигма*" [от др.-греч. *paradeigma* — образец] означает некоторую *систему общепринятых взглядов, признанных научным сообществом в рамках устоявшейся научной традиции в определенный период времени*. Па-

радигма определяет этап экстенсивного развития знания любой науки, причем в *эпистемическом плане* она характеризуется совокупностью фундаментальных знаний, ценностей, убеждений и технических приемов, выступающих в качестве образца научной деятельности, а в *социальном плане* она характеризуется разделяющим ее научным сообществом, целостность и границы которого она определяет. Таким образом, парадигма конституирует науку, объединяет сообщество ученых на основе единого стиля мышления. Следует заметить, что в настоящее время сфера применения и смысл понятия "парадигма" существенно расширились, и чаще всего оно используется как синоним мировоззрения и картины мира.

Согласно куновской модели, любой науке присущ принцип парадигмального развития, при котором основные состояния науки соответствуют одной из трех циклически сменяющихся генетических фаз: допарадигмальной, парадигмальной и межпарадигмальной.

Допарадигмальная фаза предшествует установлению парадигмы и характеризуется отсутствием науки как таковой. В этот так называемый *начальный период* развития науки ее предмет не отделен от других дисциплин, в ней царит концептуальный хаос и конкуренция большого числа расходящихся воззрений.

Парадигмальная фаза начинается с появления и признания научным сообществом доминирующей парадигмы. В этот так называемый *нормальный период* развития науки парадигма принимается, ассимилируется и становится мощным катализатором научного прогресса, выполняя, с одной стороны, проектно-программирующую, а с другой стороны — селективно-запретительную функции.

Межпарадигмальная фаза начинается с открытия в науке "аномалий" (проблем, неразрешимых в рамках принятой парадигмы), "взрывающих" изнутри текущую парадигму и порождающих новые, альтернативные парадигмы. В этот так называемый *революционный период* развития науки наступает кризис в виде конфликта новых парадигм, который разрешается победой одной из них — лидирующей, "доминантной" парадигмы.

Итак, установление парадигмы является признаком "нормальности", т. е. зрелости любой науки, причем ее развитие происходит не по принципу аккумуляции (последовательного наращивания) знаний путем присоединения новых к уже имеющимся, а по принципу смены господствующих парадигм, т. е. чередования периодов нормального и революционного состояний науки. При этом научную революцию следует рассматривать не как ка-

тастрофический процесс, периодически нарушающий нормальное развитие науки и имеющий разрушительный характер, а как созидательный процесс, связанный с интеллектуальным прорывом и значительным обновлением научных знаний.

При формулировке научной парадигмы, призванной дать полное, непротиворечивое представление о состоянии науки, часто приходится использовать язык аналогий — *метафор*, т. е. иносказаний, отражающих образные выражения понятий в переносном смысле для большей их индивидуализации, где перенос значения основан на сходстве или контрасте. Поскольку смена парадигмы связана с изменением как самого облика науки, так и его предметной области, то возникают следующие естественные вопросы: какой генетической фазе соответствует современное состояние мехатроники, каковы ее парадигмальная метафора и соответствующая предметная область?

Определения неологизма "мехатроника"

Термин "*мехатроника*" (mechatronics) введен в 1969 г. инженером Мори (Т. Mori) японской машиностроительной фирмы применительно к механическим системам с электронным управлением как неологизм, образованный слиянием слов "МЕХАНИКА" и "ЭЛЕКТРОНИКА" и означающий интеграцию знаний в соответствующих областях науки и техники, призванную обеспечить получение качественно новых свойств машин. Здесь под машиной понимается система, осуществляющая механическое движение в целях преобразования энергии, материалов и информации, необходимого для выполнения рабочего процесса.

Зарождение мехатроники как области научно-технического знания и инженерной деятельности приходится на середину 1980-х годов. Оно явилось ответом на запросы практики и связано со второй электронной революцией [6]: появление и резкий подъем производства микропроцессоров и больших интегральных схем существенно расширили возможности электронных устройств управления и позволили при малых габаритных размерах и высокой надежности придать им такие новые свойства, как функциональная гибкость и перестраиваемость в соответствии с требованиями к управляемому механическому процессу.

Следует констатировать, что до сих пор не сформирована научно обоснованная базовая терминология мехатроники, и на сегодняшний день общепринятого однозначного ее определения не существует [7—9]. Кстати, в первой монографии по мехатронике [6] не дано ее определение, а лишь

подчеркивается, что "одной из ключевых проблем мехатроники является управление механическим движением с помощью компьютера".

В *отечественной литературе* в качестве "рабочего" используется следующее определение, сформулированное в Государственном образовательном стандарте РФ по направлению "Мехатроника и робототехника": "Мехатроника — это область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями".

В *зарубежной литературе* доминирует следующее определение, приведенное в знаменитой Оксфордской энциклопедии: "Мехатроника — японский термин для описания технологий, возникающих на стыке электротехники, машиностроения и программного обеспечения. Включает проектирование, производство и изучает функционирование машин с "разумным" поведением, т. е. действующих по заданной программе, их связи с другими материалами (искусственный интеллект, измерительное оборудование, системы управления)".

Следует заметить, что в отечественной и справочной литературе термин "мехатроника" появился лишь в 2000 г. (в энциклопедии "Машиностроение" [10] и словаре "Механика машин" [11]).

Очевидно, что приведенные определения не отвечают основным критериям научно-технических терминов: однозначности, точности, четкости и краткости. Так, например, первое определение не отражает двуединую научно-техническую целостность мехатроники: оно рассматривает лишь ее технико-технологическую направленность и не учитывает ее естественно-научную направленность, связанную с производством новых знаний и реализацией объяснительной функции. Безусловно, что техническая наука, призванная обслуживать технику и технологии, является, прежде всего, наукой.

Поскольку никакие определения мехатроники не могут быть канонизированы, приведем без комментариев еще ряд ее определений, наиболее часто употребляемых в зарубежной литературе:

- область науки, которая сочетает основы механических, электронных и компьютерных инженерных наук;
- смешивание механических, электронных, программных и управленческих технических решений в объединенной структуре;

- идеология пространственного и временного интегрирования функций в инженерных устройствах и технологических процессах;
- синергетическое сочетание точной механики, электронных систем управления и информационных технологий для проектирования, производства и эксплуатации интеллектуальных автоматических систем;
- междисциплинарная инженерная область, связанная с проектированием изделий, функции которых основаны на интеграции механических и электронных компонентов, координируемых системой управления;
- философия проектирования, которая использует синергетическую интеграцию механики, электроники и компьютерных технологий для производства качественно новых изделий, процессов и систем.

С методологической точки зрения важно иметь в виду, что определение любой науки всегда ограничено и не может вобрать в себя всего богатства даже основных ее черт, что связано с многогранностью ее функций, возможностей, форм и методов. В связи с этим выдвижение различных вариантов определения позволяет глубже и с разных сторон осветить задачи науки, более полно осмыслить ее место в системе научного знания. И все же следует согласиться с высказыванием Б. Н. Петрова о том, что наличие многих определений — результат отсутствия "не только единого, а хотя бы более или менее определенного мнения о предмете науки".

Эволюция взглядов на предметную область мехатроники

Классическая механическая парадигма мехатроники. Анализ существующих многочисленных толкований термина "мехатроника", тесно связанного с его исходной японской этимологией (см., например, [12, 13]), позволяет заключить, что в отечественной литературе наиболее удачной является ее трактовка как "науки о механических, энергетических и информационных процессах и их функциональном взаимодействии в машинах с микропроцессорным управлением", а в зарубежной литературе — как "объединение механических и электронных компонентов, скоординированных архитектурой управления".

Несмотря на имеющиеся расхождения во взглядах на мехатронику и многочисленные ее определения, можно выделить следующие ключевые положения сформировавшейся к концу XX века ее *механической парадигмы*:

- ♦ *мехатроника* — область науки и техники, лежащая на стыке *механики*, микроэлектроники, информатики и автоматике;
- ♦ *мехатронная система* — целесообразное сочетание *механических устройств* и электронно-вычислительных средств контроля и управления, образующих определенную информационно-управляемую целостность;
- ♦ *предмет мехатроники* — компьютерное управление *механическим движением*.

Расширение механической парадигмы мехатроники. Любая научная парадигма является динамичной, постоянно развивающейся, причем в своем применении она варьируется, обогащается и уточняется. Исходная механическая парадигма мехатроники выделяет широкий класс систем автоматизации, основанных на "электронизации" механических процессов, т. е. электромеханических систем, в которых на электронику возлагается функция формирования алгоритма управления, прежде выполняемая механикой (в классическом центробежном регуляторе Уатта вращающиеся шары объединяют в себе функции измерения, вычисления и исполнения действий). Однако феноменальный прогресс в области вычислительной техники привел к переходу от электронной к программной среде формирования алгоритма управления. В результате алгоритмическая реализация процесса управления в немехатронных и в классических мехатронных системах осуществляется соответственно на "*механической*" и "*электронной*" основах, а в современных мехатронных системах — на "*программной*" основе.

Учитывая дальнейшую эволюцию среды формирования управляющих алгоритмов, Ослендер (D. M. Auslander), Риджли (J. R. Ridgely) и Рингенберг (J. D. Ringgenberg) в работе, посвященной проектированию управляющих программ механическими системами в реальном масштабе времени, предложили [14, с. 10] рассматривать мехатронику как "*средство принятия решений по управлению функционированием физических систем*". Очевидно, что данное толкование существенно расширяет предметную область мехатроники и обеспечивает ее инвариантность к материальной основе алгоритмической реализации процесса управления.

Поскольку перевод любой управляемой физической системы в целевое состояние всегда сопровождается определенным изменением энергии, то мехатронику можно рассматривать как "*компьютерное управление передачей физической энергии в управляемых технических системах*" [2, 15]. Здесь энергия — это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи, которая в зависи-

мости от вида физических процессов может быть механической, тепловой, электромагнитной, ядерной, гравитационной и др. Данное понятие энергии является наиболее емким, связывающим воедино все явления природы, причем передача энергии в системе может осуществляться в форме работы, либо в форме теплообмена.

Приведенная физическая трактовка мехатроники согласуется с принципиальной особенностью исполнительных механизмов микромехатронных систем [16]: данные механизмы *a priori* являются не преобразователями каких-либо механических передач или движений, а преобразователями вида энергии (как правило, электрической и тепловой в механическую). Данная трактовка мехатроники включает как частные случаи известные варианты ее конкретизации и, прежде всего, ее исходную механическую трактовку, поскольку механическое движение, т. е. изменение со временем взаимного расположения тел (или их частей) в пространстве, является одной из самых простых форм движения. Так, например, термин "мехатроника" в расширенной физической трактовке включает как частные случаи термин "кибернетическая механика", предложенный В. Ю. Тертичным-Даури [17] для класса задач управления лагранжевыми системами, а также термин "кибернетическая физика", предложенный А. Л. Фрадковым [18] для класса задач управления физическими системами (управление плазмой, лазерами, пучками частиц и т. п.).

Современная концепция предметной области мехатроники. Как известно, предмет (предметная область) науки — это те стороны, связи и отношения объекта, которые изучаются данной наукой. Обратимся к современному взгляду на предмет мехатроники.

Анализируя достижения в области совершенствования существующих и создания новых мехатронных средств автоматизации путем "электронизации" процессов управления, можно констатировать, что *происходит расширение классической механической парадигмы мехатроники, связанное с переходом от компьютерного управления механическими процессами к компьютерному управлению физическими процессами*. Такое расширение отражает эволюцию взаимосвязей различных форм движущейся материи — переход от наиболее простых, механических, к более сложным, физическим, формам движения.

Семантический анализ существующих определений мехатроники с учетом результатов анализа эволюции представлений о ее предметной области позволяет на данном этапе подвести некоторую черту и сформулировать следующие самостоятель-

ные перспективные направления в науке, технике и образовании [15, 19]:

Мехатроника — это:

- ♦ *наука о компьютерном управлении в технических системах;*
- ♦ *область техники, связанная с разработкой, созданием и использованием технических систем, содержащих механические, электронные и компьютерные компоненты, объединенные информационным процессом для достижения цели управления;*
- ♦ *научно-техническая дисциплина, изучающая общие закономерности, принципы, методы и средства компьютерного управления в технических системах на основе современных компьютерных технологий.*

При этом в мехатронике естественно выделять два основных сегмента: *теоретическую мехатронику* — область, связанную с изучением ее теоретических основ, и *прикладную мехатронику* — область, связанную с разработкой ее технических средств и методов их применения.

Обратимся к куновской модели развития науки и отметим, что мехатроника на современном этапе принимает черты полноправной, зрелой науки: ее состояние соответствует парадигмальной генетической фазе. Для данного "нормального периода" характерен эволюционный процесс развития науки, связанный с "экспансией" в новые области реального мира и вовлечением в сферу исследований новых, более сложных явлений, известный в науковедении как "нормализация" [4]. Процессу нормализации мехатроники присущи черты кумулятивности и некоторого консерватизма, при котором последовательное накопление знаний основано на общепризнанной механической парадигме и связано в основном с рационализацией, т. е. расширением и уточнением новых областей применения данной парадигмы в терминах ее концептуального и инструментального аппарата.

Наконец, подчеркнем философское значение современного постнеклассического этапа развития мехатроники. Центральной философской проблемой любой науки является ее предмет, под которым понимается изучаемый фрагмент действительности, а точнее — форма движения материи. Значение мехатроники для философского осмысления действительности заключается в том, что она призвана изучать свою, особую — *технологическую* (по терминологии В. П. Каширина) *форму движения материи*, представляющую собой совокупность процессов целенаправленного изменения различных форм вещества, энергии и информации, протекающих в технических системах [20].

Необычная "биография" прародительницы мехатроники. Анализ генезиса, т. е. возникновения и становления того или иного научного направления, является необходимым этапом оценки его современного состояния и прогнозируемого развития. В литературе долгое время отвергалась самостоятельность мехатроники и ее часто относили к той или иной области науки и техники: в Германии — к теории машин и механизмов, в Англии — к информационно-измерительной технике, в России — к механике. В последние годы пришло ясное понимание генезиса мехатроники [15, 19]: важнейшим компонентом, определяющим зарождение мехатроники, является *научно-технический комплекс "кибернетика и информатика"*.

Одним из великих событий, знаменующих прошлое столетие, явилось рождение *кибернетики* — *особой отрасли научного знания междисциплинарного характера, призванной изучать процессы управления и обработки информации в системах любой природы*. Кибернетика, во-первых, выдвинула две основополагающие идеи: о едином подходе к различным процессам управления и об информации как одной из важнейших характеристик материи, и, во-вторых, провозгласила информационно-управленческую взаимосвязь в качестве фундаментального свойства всех явлений материального мира. Универсальный характер двух феноменов — информации и управления — явился причиной небывалой экспансии кибернетической методологии в весьма различные по природе изучаемых объектов области знаний.

История кибернетики — одна из самых драматических и в то же время славных страниц истории отечественной науки [21]. Сначала появление кибернетики почти никто не заметил, а затем она была встречена настороженно и даже враждебно как "реакционная лженаука", поскольку ее ключевые идеи оказались в обрамлении метафизических и идеалистических извращений и даже идеологических выпадов. Однако уже к 1960-м годам в СССР кибернетика завоевывает всеобщее признание и становится ключевым символом научно-технического прогресса. Началась эпоха "глобальной кибернетизации": стали появляться лаборатории, отделы, кафедры, факультеты и целые институты, научные журналы и ученые советы со словом "кибернетика" в самых различных сочетаниях. Несмотря на скептическое отношение ряда ученых к кибернетике, а также многочисленные попытки умаления ее общенаучного значения, она продолжала свое победоносное шествие, доказывая право на существование не только теоретическими резуль-

татами, но и огромным вкладом в решение практических задач. Кибернетика проникла во все сферы общественной жизни, коснулась практически всех отраслей знаний.

Являясь синтетической междисциплинарной наукой, кибернетика охватила настолько широкий круг проблем управления в различных областях реального мира, что сама подверглась дифференциации и распалась на ряд самостоятельных отраслевых направлений, включая *техническую кибернетику*, предметом которой явились информационно-управленческие процессы, т. е. процессы управления и обработки информации в технических системах.

Не прошло и двух десятилетий, как кибернетика вышла за границы, очерченные ее создателем Винером (N. Wiener), и обрела статус метатеории, область действия которой значительно превзошла исходную область действия кибернетики, не являясь при этом ее заменой, альтернативой.

Кибернетику возвели в ранг "новой философии и методологии науки" и начали критиковать по поводу грядущего "кибернетического экстремизма". Миражи "кибернетизации" стали рассеиваться, а кибернетические исследования — все больше отрываться от запросов практики. В результате уже к концу 1980-х годов одиссея кибернетики практически закончилась: при молчаливом соучастии "людей Большой науки" она была тихо предана забвению и незаметно ушла из стана научного познания, причем вместе с ней ушли и все ее составляющие, включая техническую кибернетику. Касаясь сложившейся кризисной ситуации, А. А. Дородницын с сожалением констатировал [22, с. 23]: "кибернетику постигла печальная участь", а редколлегия известного журнала "Информатика и процессы управления" дала соответствующее разъяснение [23, с. 132]: "кибернетика оказалась почти в положении "живого трупа", о похоронах которого официального объявления все еще нет".

Основной причиной столь раннего "заката" кибернетики явилась "хлестаковщина": она все чаще стала расширять свои претензии и высказывать больше предположений, чем реальных практических предложений. Как следствие, она не оправдала ряд запальчивых обещаний и наряду с успехами потерпела серьезные неудачи, связанные с крушением мифа о кибернетическом чуде, способном решать все мыслимые проблемы бытия. Как заметили Л. А. Растринин и П. С. Граве [24, с. 39]: "Вольно или невольно, но кибернетика наобещала значительно больше, чем дала".

Мехатроника и "второе пришествие" кибернетики. Вряд ли отечественные и зарубежные основатели кибернетики" могли предвидеть ту парадоксаль-

ную ситуацию, в которой она оказалась. Недавно на страницах газеты "Наука в Сибири" [25, с. 4—5] развернулась дискуссия на тему "Куда "исчезла" кибернетика?", основное внимание которой было уделено обсуждению тезиса: "Кибернетика плавно перетекла в информатику". Дело в том, что в научных кругах бытует мнение, что в результате компьютерной революции живущую до сих пор в кредит кибернетику потеснила новая, более "практичная" наука — *информатика, призванная изучать все аспекты обработки информации в системах любой природы*. При этом ряд ученых пытаются отождествлять кибернетику и информатику, рассматривать их как синонимы. Так, например, В. Г. Пушкин и А. Д. Урсул [26, с. 52] допускают, что кибернетика "трансформировалась в информатику", Б. В. Бирюков отмечает [21, с. 8], что "информатика — это кибернетика на современном этапе развития", а В. Л. Береснев считает [25], что "произошла замена понятий", "слово "кибернетика" растворилось в других понятиях".

Что же все таки произошло с кибернетикой?

Официальная точка зрения на "кибернетический исход" дана в энциклопедическом словаре "Информатика" [27, с. 106]: "кибернетика уступила пальму первенства информатике, решающей многие задачи, которые впервые поставила перед собой кибернетика", причем кибернетика стала частью информатики, составляя лишь одну из восьми ее ветвей, и "может рассматриваться, как прикладная информатика в области создания и использования автоматических или автоматизированных систем управления". В результате термин "информатика" получил широкое распространение, а термин "кибернетика" стал исчезать из обращения, сохранившись формально в названиях институтов, лабораторий и кафедр, которые возникли в эпоху былого "кибернетического бума" [28]. Сегодня в "порождающей терминологии для базовых наук" кибернетика заменена информатикой, в школах основные ее понятия введены в школьный стандарт по курсу "Информатика", а в Америке (на родине кибернетики) ее просто перестали преподавать. При этом термин "кибернетика" можно услышать лишь в сочетаниях типа "киберпространство", а на вопрос, что такое "кибернетический" — получить ответ: "относящийся к интернету и к виртуальной реальности".

Термин "*информатика*" — это чисто русское изобретение, являющееся калькой с неологизма *informatique*, введенного в 1962 г. во Франции Дрейфусом (Ph. Dreyfus) путем слияния слов "ИНФОРмация" и "автоМАТИКА" для обозначения информационной автоматике или автоматизации обработки информации. В англоязычной литературе термину

"информатика" соответствует синоним *computer science*, т. е. компьютерные науки. Очевидно, что в силу своей специфики информатика не в состоянии в полной мере заполнить научный вакуум, образовавшийся после "ухода" кибернетики.

Впервые вопрос о возможной подмене кибернетики другими науками был поднят еще в 1968 г. в известном сборнике "Кибернетика ожидаемая и кибернетика неожиданная". Позже, предвидя такую подмену, один из патриархов отечественной кибернетики Б. Н. Петров утверждал, что "кибернетика и информатика — это не одно и то же" [29, с. 14], М. Г. Гаазе-Рапопорт подчеркивал [30, с. 28]: "Использование информации и ее обработка не есть кибернетика", а А. М. Федотов отмечает [25]: "Нельзя поставить тождество между кибернетикой и информатикой. Это все-таки немного разные своды наук".

В самом деле, кибернетика и информатика, внешне очень похожие дисциплины, различаются в расстановке акцентов. Так, информатика появилась благодаря развитию компьютерной техники, базируется на ней и совершенно немыслима без нее. Кибернетика же развивается сама по себе, строя различные модели управления объектами, хотя и очень активно использует достижения компьютерной техники. Считается, что в информатике отсутствует концепция управления, ключевая для кибернетики, а кибернетика существует независимо от компьютеров, занимающих по отношению к ней такое же место, как физические приборы по отношению к физике.

В начале 1980-х годов ряд ученых обратились к предсказаниям будущего кибернетики, пытаясь ответить на вопрос В. Д. Пекелиса: "Кибернетика — что же дальше?". Ответ на данный вопрос содержится во встречном вопросе В. В. Налимова [31, с. 36]: "нужны ли науке метанаучные составляющие?", а также в утверждении А. М. Федотова [25]: "Кибернетика — это типичная метанаука и, естественно при развитии из нее извлекаются "чистые" науки, которые продолжают жить самостоятельно. А сама "мета" в конечном итоге перестает существовать как наука". Данная особенность развития метанаук явилась ключевой метафорой генезиса мехатроники: *период зарождения мехатроники — закат кибернетики и рассвет информатики*.

Действительно, нетрудно убедиться в справедливости смысла данной метафоры. Как отмечает В. Д. Пекелис [32, с. 27]: "кибернетика, достигнув известной степени зрелости, сама своим развитием поставила вопрос о необходимости сузить свой предмет". Обратимся к данному выше определению мехатроники как науки о компьютерном управлении в технических системах. Ясно, что при таком

определении термин "мехатроника" эквивалентен современной, "компьютерной трактовке" ушедшего из научно-технического лексикона термина "техническая кибернетика", означающего управление в технических системах.

Непрерывная эволюция предмета технической кибернетики, обусловленная постепенным усложнением кибернетических систем, а также применением современных средств автоматизации и вычислительной техники, привела в конечном итоге к радикальному изменению ее содержания. В начале 1980-х гг. она претерпевает период компьютеризации, связанный с изобретением микропроцессорных технологий, и становится основой широко-масштабной автоматизации технических объектов и технологических процессов на базе встроенных мини- и микрокомпьютеров. Принципиальной фундаментальной инновацией здесь является переход от механических и электрических к микроэлектронным вычислительным средствам обработки информации и управления на основе микропроцессоров и интегральных схем. В связи с этим в технической кибернетике наметились два самостоятельных перспективных направления дальнейшего развития по пути разработки, создания и использования компьютерной техники: первое — для обработки информации и второе — для управления. В результате первое направление породило *техническую информатику*, а второе — *мехатронику*. Таким образом, кибернетика стала материнской наукой для информатики и прародительницей мехатроники. Мехатроника придала "второе дыхание" оказавшейся почти бездыханной кибернетике, обеспечив ее "второе пришествие".

Кстати, в аннотации к известной книге по мехатронике [6], прямо указано, что "она посвящена актуальной проблеме построения сложных автоматических систем", что по смыслу прямо совпадает с классическим определением кибернетики, данным А. И. Бергом [33, с. 5]: "Кибернетика — наука об управлении сложными динамическими системами".

По мнению некоторых ученых, мехатронике "еще предстоит сформироваться как самостоятельной науке, предстоит обрести обязательные атрибуты новой науки". Мы вправе утверждать, что мехатроника уже 20 лет назад приобрела статус самостоятельной фундаментальной технической науки [19, 34]: *мехатроника представляет собой компьютерную парадигму развития технической кибернетики* и находится с ней в таком же отношении непосредственной преемственности, какое характерно, например, для физики классической и физики современной. Ее зарождение происходило в недрах

технической кибернетики, на кибернетической платформе в соответствии с преемственностью научного знания: техническая кибернетика составила ее теоретическую, а компьютерная техника — техническую базы. При этом она естественно отражает целостное восприятие информационных, вычислительных и управляющих процессов, выраженное известным шведским специалистом в области компьютерного управления техническими системами Остремом (К. J. Åström) следующей афористичной формулой:

$$\text{Communication} + \text{Computation} + \text{Control} = C^3.$$

Кстати, еще Винер в 1954 г. дал удивительно точный прогноз именно мехатронной парадигмы развития технической кибернетики, подчеркивая, что ЭВМ будут активно использоваться для непосредственного управления исполнительными механизмами.

В заключение отметим, что в настоящее время информатика и мехатроника проходят этап своего тридцатилетнего становления и рассматриваются как перспективные "точки роста" науки и техники XXI века. При этом дальнейший научно-технический прогресс, связанный с глобальной информатизацией и мехатронизацией на основе компьютеризации и автоматизации, безусловно, приведет к наиболее полному представлению о единстве процессов управления и обработки информации.

Список литературы

1. Слесарев М. Ю. Мехатроника и развитие техносферы. Ч. I // Мехатроника. 2000. № 1. С. 11—16.
2. Филимонов Н. Б. Мехатронная парадигма развития техносферы // Аэрокосмические технологии: Материалы Первой междунар. науч.-техн. конф., посвященной 90-летию со дня рож. В. Н. Челомея. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, НПО Машиностроение, 2004. С. 235—239.
3. Степин В. С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000.
4. Ушаков Е. В. Введение в философию и методологию науки: Учебник. М.: Изд-во "Экзамен", 2005.
5. Кун Т. Структура научных революций. М.: Прогресс, 1975.
6. Мехатроника / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. М.: Мир, 1988.
7. Антонов Б. И., Филимонов Н. Б. Не "обо всем", а о мехатронике (о границах проблематики журнала) // Мехатроника. 2000. № 6. С. 43—47.
8. Аршанский М. М., Шалобаев Е. В. Мехатроника: основы глоссария // Мехатроника, автоматизация, управление. 2001. № 4. С. 47—48.
9. Шалобаев Е. В. К вопросу об определении мехатроники и иерархии мехатронных объектов // Датчики и системы. 2001. № 7. С. 64—67.
10. Слесарев М. Ю. Мехатроника, основные понятия, современный и прогнозируемый уровень мехатронных систем // Ма-

шиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. Т. Ш-8. М.: Машиностроение, 2000. С. 714—731.

11. **Крайнев А. Ф.** Механика машин: Фундаментальный словарь. М.: Машиностроение, 2000.

12. **Введение** в мехатронику: Учеб. пособие / А. К. Тугенгольд, И. В. Богуславский, Е. А. Лукьянов и др. Под ред. А. К. Тугенгольда. В 2-х кн. Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2002—2004.

13. **Подураев Ю. В.** Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006.

14. **Ослендер Д. М., Риджи Дж. Р., Рингенберг Дж. Д.** Управляющие программы для механических систем: объектно-ориентированное проектирование систем реального времени. М.: БИНОМ Лаборатория базовых знаний, 2004.

15. **Филимонов Н. Б.** Эволюция мехатроники // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып. 3. Системы управления. Т. 2. Тула: ТулГУ, 2006. С. 277—281.

16. **Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мунасыпов Р. А.** Основы микроробототехники: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2004.

17. **Тертычный-Даури В. Ю.** Адаптивная механика. М.: Факториал, Факториал Пресс, 2003.

18. **Фрадков А. Л.** Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003.

19. **Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями // Мехатроника, автоматизация, управление: Материалы 5-й науч.-техн. конф. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 9—20.

20. **Техническое творчество:** теория, методология, практика. Энциклопедический словарь-справочник / Под ред. А. И. Половинкина и В. В. Попова. М.: НПО "Информ-система", 1995.

21. **Бирюков Б. В.** Кибернетика, информатика, вычислительная техника, автоматика: Проблемы становления и развития. Вклад отечественной науки // Кибернетика: прошлое для будущего. М.: Наука, 1989. С. 7—45.

22. **Кибернетика.** Становление информатики. М.: Наука, 1986.

23. **Дидук Н. Н., Кваль В. Н.** Существует ли наука кибернетика? (О роли кибернетики в естествознании) // Проблемы управления и информатики. 2001. № 3. С. 133—135.

24. **Растринин Л. А., Граве П. С.** Кибернетика как она есть. М.: Молодая гвардия, 1975.

25. **Куда "исчезла" кибернетика?** (круглый стол "НВС") // Наука в Сибири. № 37(2622), 27 сент. 2007 г.: <http://www.sbras.ru/HBC/hbc.phtml9+432+1>

26. **Пушкин В. Г., Урсул А. Д.** Информатика, кибернетика, интеллект. Философские очерки. Кишинев: Изд-во "Штиинца", 1989.

27. **Информатика:** Энциклопедический словарь для начинающих / Сост. Д. А. Поспелов. М.: Педагогика-Пресс, 1994.

28. **Поспелов Д. А.** Становление информатики в России // Очерки истории информатики в России / Сост. Д. А. Поспелов, Я. И. Фет. Новосибирск: Науч.-изд. центр ОИГГМ СО РАН, 1998.

29. **Петров Б. Н.** Кибернетика на новом этапе // Кибернетика. Дела практические. М.: Наука, 1984. С. 14—26.

30. **Гаазе-Рапопорт М. Г.** Куда идет кибернетика? Там же. С. 26—36.

31. **История информатики в России:** ученые и их школы / Сост. В. Н. Захаров, Р. И. Подловченко, Я. И. Фет. М.: Наука, 2003.

32. **Пекелис В. Д.** Кибернетическая смесь: Впечатления, находки, случаи, заметки, размышления, рассказанное и увиденное — разные поводы для разговора о кибернетике. М.: Знание, 1991.

33. **Кибернетика, мышление, жизнь** / Под ред. А. И. Берга, Б. В. Бирюкова, И. Б. Новика и др. М.: Мысль, 1964.

34. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов Н. Б.** От кибернетики к информатике и мехатронике: эволюция современных представлений // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X Междунар. конф. Самара: Самарский ЦНЦ РАН, 2008. С. 22—25.

ИНФОРМАЦИЯ

28 сентября—4 октября 2009 г.

пос. Дивноморское Геленджикский район, Краснодарский край

В рамках Международной научно-технической мультikonференции

"Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники" (ИКТМР-2009)

состоится локальная научно-техническая конференция

"МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ" (МАУ-2009)

Председатель — член-корр. РАН Е. Д. Теряев

Направления конференции

- ◆ Проблемы управления в мехатронных системах.
- ◆ Проблемы интеллектуализации и миниатюризации мехатронных систем.
- ◆ Функциональные элементы мехатронных систем.
- ◆ Проектирование и моделирование мехатронных систем.
- ◆ Проблемно-ориентированные мехатронные системы.

Подробную информацию о мультikonференции ИКТМР-2009 и локальной конференции МАУ-2009 см. на сайте <http://www.mvs.tsure.ru>

Б. В. Соколов, д-р техн. наук, проф.,

Р. М. Юсупов, чл.-кор. РАН, проф.,

Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук

(СПИИРАН)

sokol@iias.spb.su

Роль и место некибернетики в современной структуре системных знаний

Основными объектами рассмотрения в статье являются некибернетика, информатика и общая теория систем, а также вопросы их взаимодействия. При этом под некибернетикой авторы понимают кибернетику II порядка (*second cybernetics*, кибернетику XXI века) — междисциплинарную науку, ориентированную на разработку методологии постановки и решения проблем анализа и синтеза интеллектуальных процессов и систем управления сложными объектами произвольной природы. Авторами получен ряд интересных научных результатов в области теории управления структурной динамикой сложных технических объектов (УСД СТО), которая является одним из разделов некибернетики. В качестве примера в статье предлагается обобщенная процедура решения проблемы УСД СТО.

Ключевые слова: некибернетика, информатика, общая теория систем, управление сложностью, теория управления структурной динамикой сложных объектов.

На современном этапе развития науки и техники научно-технический прогресс охватывает все новые и новые сферы человеческой деятельности. Передовые компьютерные и телекоммуникационные технологии значительно повышают эффективность производства, сокращают расходы всех видов ресурсов и сырья, экономят время. На рубеже XX и XXI веков начался переход от индустриального к информационному обществу во многих ведущих мировых державах. Однако человечество до конца не осознает всю опасность и глубину основного противоречия нашей эпохи, связанного с увеличивающимся несоответствием между возрастающими потребностями человечества и ухудшающимися возможностями их удовлетворения за счет окружающей среды. Наиболее остро указанное противоречие проявляется при возникновении различных масштабных аварий, катастроф и других чрезвычайных ситуаций, которые без оперативного принятия специальных мер могут привести к большим человеческим жертвам, материальным потерям и ряду многих других негативных факторов. Одна из главных причин возникновения подобных ситуаций связана с усилением роли факторов сложности в существующих и проектируемых организационно-технических системах, используемых в различ-

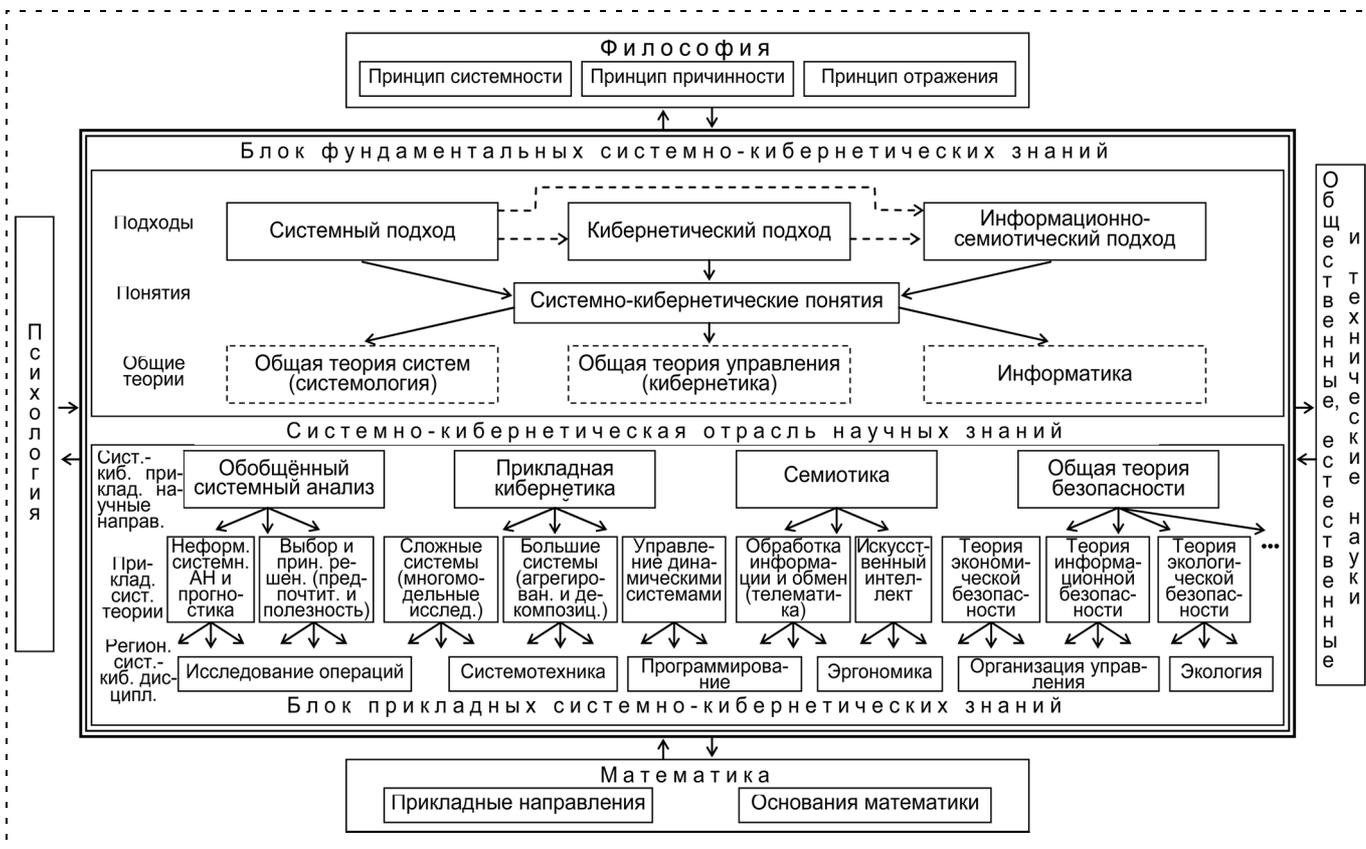


Рис. 1

ных предметных областях. При этом, говоря о проблемах сложности современных объектов-оригиналов (реальных и абстрактных), принято выделять следующие основные аспекты: *структурную сложность, сложность функционирования, сложность принятия решений и выбора сценариев поведения, сложность развития, сложность их формального описания и моделирования* [21].

К настоящему времени наука создала богатый методологический и методический аппарат, позволяющий успешно преодолевать трудности, связанные с воздействием факторов сложности в современном мире. В основу положена системная отрасль научных знаний (рис. 1), в ядре которой, прежде всего, выделяют такие научные направления, как *кибернетика, информатика и общая теория систем* [21]. Возникновение системной отрасли научных знаний является велением времени, так как на данном этапе развития науки (этапе интеграции научных знаний) на передний план в развитии научных знаний выступает методология, требующая сочетания (единства) процессов анализа и синтеза при изучении свойств сложных объектов и процессов как целостных образований, состоящих из взаимосвязанных частей и обладающих качественно новыми свойствами по сравнению со свойствами этих частей. При этом в настоящее время речь должна идти не о взаимном поглощении, а о взаимном дополнении, концептуальном и идейном взаимообогащении, гармоничном и согласованном развитии перечисленных междисциплинарных наук. В данной статье анализируются современные тенденции в системной отрасли научных знаний, вызванные новым этапом развития кибернетики, которую в связи с этим предлагается называть *неокибернетикой* [32, 39].

Кибернетика — история становления и развития

Изначально основоположником кибернетики Н. Винером в 1948 г. в книге "Кибернетика или управление и связь в животном и машине" подчеркивалось, что данная наука является наукой об управлении, связи и переработке информации в *системах любой природы* [4, 5]. При этом главная цель исследований, проводимых в рамках указанной науки, состояла в выявлении и установлении наиболее общих законов функционирования, которым подчиняются как управляемые объекты, так и соответствующие управляющие подсистемы независимо от их природы. Анализ определения, данного Н. Винером, показывает, что системообразующим в кибернетике является положение о главенствующей

роли информационных процессов и обратной связи в ходе формирования и реализации соответствующих управляющих воздействий. Содержание этих процессов идентично в системах различной природы: биологических, технических, социальных и т. п. [4, 5, 8]. Указанное положение получило свое прекрасное подтверждение в ходе создания универсальных преобразователей информации — электронно-вычислительных машин, которые поэтому долгое время называли и в нашей стране, и за рубежом кибернетическими машинами. Таким образом, в области системно-кибернетических исследований изначально была сформирована логически стройная и объективно обусловленная цепочка фундаментальных системных понятий: кибернетика — управление — информационные процессы — универсальный преобразователь информации (ЭВМ, кибернетическая машина) [8]. Однако в дальнейшем в силу ряда объективных и субъективных причин эта взаимосвязанная и взаимообусловленная цепочка была разорвана, что привело к ряду негативных последствий как в области современной кибернетики, так и информатики. При этом современная тотальная экспансия компьютерных технологий создала у многих иллюзию их универсальности и способности решить любые проблемы. К сожалению, произошедшие к настоящему времени многочисленные аварии и катастрофы, причинами которых было несовершенство указанных технологий, позволило многим ученым в США и Европе заговорить о "компьютерном разрушении западной цивилизации" и построении не информационного общества, а общества риска [18, 27].

Становление кибернетики как науки в нашей стране, как часто это бывало в других областях народного хозяйства, шло по принципу от одной крайности к другой. Вначале, в основном благодаря усилиям наших политологов и философов, кибернетику на протяжении нескольких лет (1948—1955 гг.) обвиняли во всех смертных грехах. Но буквально через несколько лет делается резкий поворот в отношении к кибернетике в нашей стране, и ее начинают превозносить. Одна из причин таких резких перемен была связана с тем, что в начале 60-х годов руководство страны и наши экономисты, отмечая рост сложности экономики и соответствующих процессов управления, искали научные основы организации современного производства, его децентрализации и оптимизации. В рамках кибернетики указанные вопросы формулировали и решали довольно строго. В итоге проведенных в 60—70-е годы в нашей стране и за рубежом исследований по проблемам общей теории управления (кибернетики)

был сформулирован и доказан ряд фундаментальных положений.

Было доказано, что [1—5, 8, 13, 15]: *во-первых*, важнейшим атрибутом любой системы (биологической, технической, социальной и т. п.) являются механизмы управления, поддерживающие систему в целостном состоянии и обеспечивающие целесообразное ее поведение в пространстве и времени; *во-вторых*, управление в системе любой природы есть целенаправленный процесс, предполагающий наличие вполне определенной цели; *в-третьих*, управление в системе любой природы есть информационный процесс, заключающийся в сборе, передаче и переработке информации; *в-четвертых*, регулярное и целенаправленное управление возможно только в замкнутом контуре, состоящем из управляющих и управляемых объектов, соединенных между собой прямыми и обратными линиями (цепями) связи; и, наконец, *в-пятых*, управление есть циклический процесс, а самоуправление должно быть оптимальным.

Таким образом, классическая кибернетика свела все ранее существовавшие взгляды на процессы управления в единую систему и доказала ее полноту и всеобщность. Другими словами, она предметно продемонстрировала повышенную мощь системного подхода к решению сложных проблем [1—3, 10]. Наиболее разработанным направлением в кибернетике явилась теория управления динамическими техническими системами, в рамках которой отечественными и зарубежными специалистами были получены многочисленные выдающиеся фундаментальные и прикладные научные результаты [3, 7, 13, 14].

Новый всплеск интереса в мире к кибернетике на рубеже XX—XXI веков обусловлен, во-первых, все более усиливающейся в различных предметных областях проблемой сложности и, во-вторых, повсеместно проявляющимися недостатками практического применения холистического или, по-другому, системного мышления в индустрии информационных технологий (ИТ-индустрии) [6, 17, 18, 29, 35]. Решение проблем управления сложными объектами требует проведения междисциплинарных исследований с привлечением специалистов разных специальностей: экономистов, биологов, физиков, математиков, специалистов в области компьютерных технологий и др.

Таким образом, характеризуя современное состояние исследований в области кибернетики, необходимо отметить, что объявленная основоположниками кибернетики всеобщность законов данной теории остается, к сожалению, пока преимущест-

венно декларацией, слабо подтвержденной конструктивным обоснованием именно ее всеобщности (это касается, прежде всего, сложных организационно-технических и социально-экономических систем). Образовавшийся в настоящее время разрыв между кибернетикой и соответствующими прикладными теориями управления, с одной стороны, и информатикой, с другой стороны, является ярчайшим подтверждением сложившейся ситуации. В этих условиях необходимо принимать безотлагательные меры по ликвидации данного разрыва.

Неокибернетика — концептуальные основы и текущее состояние

Анализ современного состояния фундаментальных и прикладных научных работ в области проблем управления сложностью показал, что время реакции и адаптации теоретических исследований в указанной области на те перемены, которые вызваны научно-техническим прогрессом, значительно превышает интервал между его очередными изменениями. Все это требует проведения упреждающих исследований, основанных на прогнозировании возможных проблем в рассматриваемой предметной области и разработке соответствующих методологических и методических основ их решения. Применительно к вопросам развития кибернетики можно говорить о нескольких наметившихся тенденциях (направлениях исследований).

Говоря о первой тенденции, отметим, что за прошедшие десятилетия эры классической (винеровской) кибернетики многие авторы делали попытки пересмотреть ее научно-методологические основы. Так, еще в 1963 г. в статье М. Маруамы [38] появился термин "кибернетика второго порядка" (second cybernetics). В отличие от классической кибернетики (кибернетики первого порядка) в новых кибернетических системах предлагалось вводить в рассмотрение контуры положительной обратной связи для усиления полезных входных воздействий и флуктуаций и контуры отрицательной обратной связи для ослабления нежелательных входных воздействий. Согласно взглядам, высказанным М. Маруамой, такая модель более правдоподобно объясняет природу процессов обучения, адаптации, социальных взаимодействий. Указанные свойства данных кибернетических систем нового поколения в работе [29] предлагалось называть свойствами операциональной замкнутости и избирательной чувствительности. Формирование данных свойств предполагает, во-первых, исходя из складывающейся обстановки особую настройку структуры рассматриваемых сис-

тем на заданный класс входных воздействий и, во-вторых, целенаправленный выбор соответствующих порогов срабатывания синтезируемых контуров управления с отрицательными и положительными обратными связями. Это особенно важно при оперативном выявлении и ликвидации самовозбуждающихся контуров (сетей), которые могут возникать в структурах современных организационно-технических систем [6, 27, 29]. Опасность таких контуров связана с тем, что в них малые возмущающие воздействия с течением времени могут привести к катастрофическим последствиям [27, 29].

Н. Фойрстер в статье "Кибернетика кибернетики" [37] в 1974 г. определил кибернетику первого порядка как кибернетику наблюдаемых систем,

а кибернетику второго порядка — как кибернетику наблюдения, включающую наблюдателя. По мнению Н. Фойрстера, основным объектом исследований кибернетики второго порядка являются процессы взаимодействия между наблюдателем и тем, что наблюдается, и данная теория должна быть, прежде всего, ориентирована на живые системы, причем не столько на управление ими, сколько на познание процессов развития и нарастания биологической и социальной сложности. При этом в ряде работ [1, 2, 6, 29, 30, 36] подчеркивается глубокая общность биологических объектов и современных информационных систем из-за их сетевой организации. Разрабатываемые в настоящее время архитектуры, ориентированные на сервисы и базирую-



Рис. 2

щиеся на концепции виртуализации своих компонентов, создают материальную основу для синтеза принципиально новых информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем, которые по своим свойствам будут приближаться к свойствам живых организмов. Одним из классиков современной кибернетики С. Биром в работах [1, 2] было показано, как на основе нейрофизиологической интерпретации функционирования центральной нервной системы человека удается построить оригинальную пятиуровневую модель жизнеспособной системы, в которой за счет гибкого сочетания механизмов иерархического и сетевого управления можно находить необходимый (в зависимости от складывающейся ситуации) компромисс между централизацией и децентрализацией целей, функций, задач и операций, выполняемых в соответствующей организации и определяющих ее специфику. Данную модель С. Бир успешно использовал при решении различных классов задач прогнозирования и анализа путей развития сложных социально-экономических систем [2]. При этом в своих работах С. Бир неоднократно подчеркивал, что конструктивное исследование многоаспектной проблемы сложности должно базироваться на дальнейшем диалектическом развитии принципа необходимого разнообразия, сформулированного Р. Эшби. Анализ ряда работ в области современной кибернетики [2, 8, 13, 15, 24, 26, 29] позволил сформулировать ряд конкретных направлений по реализации данного принципа (рис. 2), которые могут быть положены в основу концепций неокибрнетики.

В работах [2, 13, 17, 23, 26] перечисленные направления реализации принципа необходимого разнообразия получили свою дальнейшую конкретизацию и развитие для ряда весьма интересных предметных областей. Авторами данных работ подчеркивается особая актуальность разработки методологических и методических основ решения проблем *управляемой самоорганизации* как наиболее эффективного способа борьбы с разнообразием внешней среды, базирующейся на реализации целенаправленных процессов поддержания динамического соответствия структур и функций в сложных организационно-технических и социально-экономических системах. К настоящему времени получен ряд интересных теоретических и практических результатов при исследовании проблем управления структурной динамикой сложных технических объектов в различных предметных областях [12, 17, 23, 25].

К другим новациям в развитии кибернетики можно отнести также *эволюционную кибернетику* [20],

которая изучает кибернетические свойства живых систем и принципы, методы и модели обработки информации в них; *кибернетическую физику*, представляющую собой новое междисциплинарное научное направление, связанное с исследованием физических систем кибернетическими методами [28]; *геофизическую кибернетику*, в рамках которой изучаются проблемы управления состоянием неживых природных объектов [33]; *космическую кибернетику*, ориентированную на разработку методологических и методических основ автоматизации процессов управления современными и перспективными космическими средствами [11].

Еще одной тенденцией, связанной со становлением неокибрнетики, является ее взаимодействие с другими научными дисциплинами и направлениями в рамках интенсивно развиваемой в настоящее время междисциплинарной отрасли системных знаний (см. рис. 1) [21]. При этом важнейшую роль в дальнейшем развитии идей и концепций в процессе становления неокибрнетики будут продолжать играть *информатика и общая теория систем* [8, 10, 11, 16, 19, 22, 34, 35].

Говоря о процессах взаимодействия кибернетики с информатикой, следует отметить, что, во-первых, информатика исторически развивалась в значительной мере в недрах традиционной кибернетики, фактически на единой технической базе — вычислительной технике и средствах связи и передачи данных и, во-вторых, кибернетика, являясь наукой об общих законах и закономерностях управления и связи, объективно была вынуждена заниматься вопросами использования информации в интересах управления. Информационная составляющая пронизывала и некоторые ранние определения кибернетики.

Сегодня, как нам представляется, информатика и кибернетика могут рассматриваться как относительно молодые самостоятельные научные направления, имеющие свои теоретико-методологические основы, задачи, объекты и предметы исследования. Данное утверждение можно раскрыть с помощью сравнительной таблицы. Заметим также, что кибернетика и информатика в их современном состоянии могут рассматриваться как отдельные научные направления, развивающиеся, если можно так сказать, в режиме "сиамских близнецов". Это качество, которое в таблице условно показано заштрихованной полоской, проявляется в таких научных дисциплинах, как шенноновская теория информации, теория искусственного интеллекта, распознавание образов, теория моделирования, теоретические основы вычислительной техники и др., которые раз-

Основные понятия кибернетики и информатики

Аспекты сравнения	Кибернетика	Информатика
Определение	Наука об общих законах и закономерностях управления и связи в сложных системах различной природы	Наука об информации, методах и средствах обработки, хранения, передачи и представления и защиты информации
Объект исследования	Управление, процессы управления	Информация, информационные процессы
Предмет исследования	Системы и технологии управления	Информационные системы и технологии
Основные понятия	Управление, процессы управления, система управления, обратная связь, модель, информация, технология управления...	Информация, информационные процессы, системы, технологии, модель...
Основная прикладная задача	Анализ и синтез технологий и систем управления	Создание информационных технологий и информационных систем

ными авторами и разными вузовскими учебными планами причисляются то к кибернетике, то к информатике. В значительной мере это определяется двумя обстоятельствами: во-первых, молодостью рассматриваемых наук, которые еще переживают период формирования и становления; во-вторых, превалированием субъективных интересов отдельных научных школ или научных авторитетов при определении границ того или иного научного направления.

Можно согласиться с мнением, что обоснование структуры той или иной науки должно базироваться на определенном науковедческом принципе или, по крайней мере, на здравом смысле. Так, к информатике как фундаментальной междисциплинарной науке, где в прямой постановке рассматриваются вопросы формирования (производства) данных, информации и знаний, а также вопросы создания и применения методов и средств работы с ними, можно применить, как нам представляется, следующий подход. В информатике в основном изучаются теория информационных процессов и методы и средства оперирования с информацией в общем случае, безотносительно к областям применения и использования информации (на рис. 1 — блок фундаментальных системно-кибернетических знаний). Вопросы использования и применения информации изучаются уже в других научных дисциплинах (на рис. 1 — блок прикладных системно-кибернетических знаний). В частности, проблемы использования информации для управления объектами различной природы изучаются в кибернетике и теории управления. Изучение и использование информации о состоянии здоровья человека рассматриваются в медицине, информационные процессы в обучении исследуются в педагогике и т. д.

В отмеченном аспекте информатику можно сравнить с математикой. Так, например, дифференциальные уравнения широко используются во многих науках. В то же время основы теории дифференциальных уравнений, методы их решения, свойства

этих решений изучаются в математике. Аналогично можно также разделить объекты и предметы исследований кибернетики (неокибернетики), которая рассматривается в данном случае в качестве общей теории управления объектами произвольной природы, и прикладных теорий управления, в которых общие закономерности и законы, сформулированные в кибернетике (неокибернетике), получают свою конкретизацию и интерпретацию применительно к каждой конкретной предметной области.

В последние годы отмечается второй виток сближения кибернетики и информатики. Происходит активное терминологическое и содержательное взаимопроникновение этих научных направлений. Так, методы, технологии и средства, разрабатываемые в недрах информатики, активно внедряются в кибернетику в рамках таких новых научных направлений, как *информационное управление, управление информацией*, различные виды *интеллектуального управления* (ситуационное, нейроуправление, управление, основанное на знаниях, на основе эволюционных алгоритмов, многоагентное управление и т. д.). В свою очередь, кибернетическая терминология проникает в информатику и вычислительную технику. Сегодня, в частности, весьма популярными в области ИТ-индустрии становятся понятия и, соответственно, стратегии *адаптивных и проактивных компьютерных систем, адаптивного управления и адаптивного предприятия*. Эти стратегии интенсивно развиваются компаниями IBM, Intel Research, Hewlett Packard, Microsoft, Sun и др. [6, 30]. При этом создается материальная основа для реализации технологий управляемой самоорганизации. В современных бизнес-системах (БС) успехов добиваются только те организации, в которых развитие ИТ-архитектур ориентировано на Web-сервисы и технологии, позволяющие эффективно децентрализовать традиционные системы принятия решений, превращая их в саморегулируемые подсистемы. В этом случае главными функциями

руководства БС являются уже не функции централизованного планирования и управления, а функции динамической координации и коммутации указанных подсистем [30].

Взаимодействие кибернетики с *общей теорией систем* осуществляется по нескольким направлениям. Первое из этих направлений непосредственно связано с обобщенным описанием объектов и субъектов управления на основе новых формальных подходов, разрабатываемых в современной системологии, к числу которых можно, например, отнести структурно-математический и категорийно-функторный подходы [21]. В связи с этим можно также отметить интересные научные результаты, которые были получены в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов и могут быть использованы в кибернетике. К этим результатам, в первую очередь, можно отнести: систему показателей, оценивающих качество моделей и полимодельных комплексов и предназначенных для описания процессов управления; обобщенное описание (макро-описание) различных классов моделей (макро-модели), позволяющее, во-первых, устанавливать взаимосвязи и соответствия между видами и родами моделей и, во-вторых, сравнивать и упорядочивать их, используя различные метрики; комбинированные методы оценивания показателей качества моделей (полимодельных комплексов), заданных с использованием числовых и нечисловых (номинальных, порядковых) шкал; методы и алгоритмы решения задач многокритериального анализа, упорядочения и выбора наиболее предпочтительных моделей (полимодельных комплексов), управления их качеством [22, 24, 31]. В кибернетике также при решении задач управления сложными объектами широко используются методы и алгоритмы декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования) и координации, разрабатываемые в общей теории систем применительно к объектам живой природы.

Вместе с тем, в работе [24] было показано, что подходы, разработанные в классической теории управления техническими объектами, можно успешно применять при организации процессов управления качеством моделей и полимодельных комплексов, а также при их структурной и параметрической адаптации. Другие направления взаимодействия кибернетики и научных дисциплин, входящих в состав системно-кибернетической отрасли знаний, описаны в работах [3, 7–10, 19, 34].

В заключение приведем ориентировочный состав, структуру, основные объекты, предметы, проблемы и задачи исследований кибернетики XXI ве-

ка, которую в силу существенных особенностей как объектов, так и субъектов управления, а также той среды, где осуществляется их взаимодействие, предлагается называть *неокибернетикой*, подчеркивая, тем самым, необходимость и актуальность разработки принципиально новых подходов к разработке ее методологических и методических основ.

Неокибернетика — кибернетика II порядка (second cybernetics) — междисциплинарная наука, ориентированная на разработку методологии постановки и решения проблем анализа и синтеза интеллектуальных процессов и систем управления сложными объектами произвольной природы, обладающие свойством избирательности и операциональной замкнутости, а также способностью моделировать среду и себя в ней (кибернетика наблюдения, включающего и самого наблюдателя).

Основные объекты исследования и их свойства — системы управления (СУ), объекты управления (ОУ), управляющие подсистемы (УП), имеющие повышенную сложность и размерность и обладающие следующими свойствами и характеристиками: избыточность, многофункциональность, распределенность, унификация, однородность основных элементов, подсистем и связей; структурная динамика, нелинейность и непредсказуемость поведения; иерархически-сетевая структура; неравновесность, неопределенность от вмешательства и выбора наблюдателя; постоянное изменение правил и технологий функционирования, наличие как контуров отрицательной, так и положительной обратной связи, приводящих к режимам самовозбуждения (режимам с обострением); наряду с детерминированным и стохастическим поведением возможно хаотическое поведение; ни один элемент не обладает полной информацией о системе в целом; избирательная чувствительность на входные воздействия (динамическая робастность и адаптация); время реагирования на изменения, вызванные возмущающими воздействиями, оказывается больше, чем время проявления последствий этих изменений, чем интервал между этими изменениями; абсолютную полноту и достоверность информации описания реального объекта получить принципиально невозможно в соответствии с пределом Бремерманна и теоремой Геделя.

Предмет исследования — разработка научных основ формализации и решения проблем структурно-функционального анализа, мониторинга и синтеза адаптивных и самоорганизующихся интеллектуальных технологий и систем управления (АдИССУ) сложными объектами произвольной природы (СОПП).

Цели исследования — создание кибернетических систем нового поколения, обладающих следующими основными свойствами: самосознание и проактивность; способности к переконфигурированию (самоконфигурированию), самосовершенствованию, самооптимизации, самолечению, самосохранению; общественное поведение, коммуникабельность, благожелательность и правдивость.

Основные понятия — сложность, структурная динамика, эмерджентность, макросостояния, структурное состояние, многоструктурное состояние, многоструктурное макросостояние, проактивность, комплексное моделирование, квалиметрия моделей и полимодельных комплексов.

Основные классы решаемых задач — задачи управления сложностью, включающие в себя: задачи целенаправленного и обоснованного создания (расширения разнообразия в интеллектуальных СУ, сужения разнообразия внешней среды); задачи декомпозиции (композиции), агрегирования (деагрегирования), координации, линеаризации, аппроксимации, релаксации при моделировании, анализе и синтезе АдИССУ СОПП; задачи управления структурной динамикой АдИССУ; задачи квалиметрии моделей и полимодельных комплексов АдИССУ; традиционные задачи "классической кибернетики I порядка" применительно к АдИССУ.

Основные принципы и подходы — структурно-математический и категорийно-функторный подходы, системный подход и его концепции и принципы, включающие в себя: принципы неокончателных решений, поглощения разнообразия, иерархической компенсации, дополнительности, полимодельности и многокритериальности, самоподобного рекурсивного описания и моделирования объектов исследования, гомеостатического баланса взаимодействия; преодоление принципа разделения; принципы, положенные в основу создания онтологий; принципы Ле-Шателье—Брауна (любое внешнее воздействие порождает ответную реакцию самоорганизации, направленную на ослабление этого эффекта); принципы декомпозиции и агрегирования; принцип рационального многокритериального компромисса при наличии неустраиваемых пороговых информационных и временных ограничений; принцип интерактивного итерационного формирования решения в условиях неопределенности и противоречивости исходной информации.

Нерешенные проблемы — организация и проведение междисциплинарных исследований по проблемам управления развитием АдИССУ СОПП; исследование базовых свойств АдИССУ (самоконфигурирование, самообслуживание, самооптимиза-

ция, отказоустойчивость, самозащита) и факторов, на них влияющих; разработка методов, алгоритмов, моделей обоснования, анализа и синтеза адаптивных информационных технологий организации и реализации процессов функционирования АдИССУ с учетом объективных потребностей в соответствующих данных, информации и знаниях; исследование вопросов взаимодействия АдИССУ с пользователями, правильной интерпретацией ими поставленных целей и задач, их действий в случае некорректной постановки задач; анализ возможных путей использования принципов и способов поведения биологических систем при синтезе АдИССУ.

К настоящему времени авторами статьи в рамках проводимых ими междисциплинарных исследований по формированию методологических и методических основ неокибрнетики был получен ряд интересных теоретических и практических результатов в области управления структурной динамикой сложных технических систем (СТС) в различных предметных областях [12, 17, 23, 25]. В частности, было установлено, что одной из основных особенностей современных СТС является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин. Другими словами, на практике мы сталкиваемся постоянно со структурной динамикой СТС. В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей СТС либо обеспечения наилучших условий деградации указанных систем необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе — управление реконфигурацией структур СТС).

В настоящее время существуют различные варианты управления структурной динамикой СТС. Среди них можно выделить, в первую очередь: изменение способов, целей функционирования СТС, их содержания, последовательности выполнения в различных условиях; перемещение в пространстве отдельных элементов и подсистем СТС; перераспределение и децентрализацию функций, задач, алгоритмов управления, информационных потоков между уровнями СТС; использование гибких (сокращенных) технологий управления СТС; реконфигурацию структур СТС при их деградации.

Задачи управления структурной динамикой (УСД) СТС по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика СТС и формирования соответствующих программ управления их развитием. Главная трудность и особенность решения задач рассматриваемого класса состоит в следующем. Определение опти-

мальных программ управления основными элементами и подсистемами СТС может быть выполнено лишь после того, как станет известен перечень функций и алгоритмов обработки информации и управления, который должен быть реализован в указанных элементах и подсистемах. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам СТС зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами. Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется еще и тем, что под действием различных причин во времени изменяется состав и структура СТС на различных этапах ее жизненного цикла.

К настоящему времени рассматриваемый класс задач структурно-функционального синтеза и управления развитием СТС исследован недостаточно глубоко. Получены новые научные и практические результаты в рамках следующих направлений исследований:

- синтез технической структуры СТС при известных законах функционирования основных элементов и подсистем СТС;
- синтез функциональной структуры СТС или, по-другому, синтез программ управления основными элементами и подсистемами СТС при известной технической структуре СТС;
- синтез программ создания и развития новых поколений СТС без учета этапа совместного функционирования существующей СТС и внедряемой СТС.

Известен ряд итерационных процедур получения совместного решения задач, исследования которых проводятся в рамках 1-го и 2-го направлений. В целом все существующие модели и методы структурно-функционального синтеза облика СТС и формирования программ их развития используются на этапах внешнего и внутреннего проектирования облика СТС, т. е. тогда, когда фактор времени не является существенным.

В рамках разработанного авторами подхода удалось с единых позиций подойти к решению всего спектра задач структурно-функционального синтеза СТС, возникающих на различных этапах их жизненного цикла. Динамическая и управленческая интерпретация указанных задач, а также реализация концепции комплексного моделирования позволили при их исследовании на конструктивном уровне использовать фундаментальные и прикладные результаты, полученные к настоящему времени в таких научных дисциплинах, как исследование операций, искусственный интеллект, теория управления, теория принятия решений, системный анализ.

В заключение в качестве примера приведем содержание предложенной авторами обобщенной процедуры решения задач управления структурной динамикой СТС, в соответствии с которой на первом этапе должно осуществляться формирование (генерирование) допустимых вариантов многоструктурных макросостояний СТС или, другими словами, должен проводиться структурно-функциональный синтез нового облика СТС, соответствующего складывающейся (прогнозируемой) обстановке.

В указанной ситуации задачи, решаемые на первом этапе, сводятся к задачам динамического структурно-функционального синтеза СТС. Обобщенный алгоритм структурно-функционального синтеза облика СТС должен включать в себя следующие основные шаги.

Шаг 1. Формирование, анализ и интерпретация исходных данных, используемых при генерировании (синтезе) многоструктурных макросостояний СТС, построение или коррекция описания моделей, используемых при структурно-функциональном синтезе облика СТС.

Шаг 2. Планирование процесса решения задачи генерирования (синтеза) многоструктурных макросостояний СТС. Определение затрат времени и других ресурсов, необходимых для решения рассматриваемой задачи.

Шаг 3. Построение и аппроксимация множества достижимости (МД) динамической системы, с помощью которого неявно задаются варианты облика СТС (варианты многоструктурных макросостояний СТС).

Шаг 4. Ортогональное проектирование на МД множества, с помощью которого задаются требования, предъявляемые к новому облику СТС.

Шаг 5. Формирование и интерпретация выходных результатов, представление их в удобном для последующего использования виде (например, для разработки адаптивных планов развития СТС и соответствующих регулирующих воздействий, обеспечивающих реализацию данных планов с требуемой степенью устойчивости).

На втором этапе проводятся выбор и реализация конкретного варианта многоструктурного макросостояния СТС с одновременным синтезом (построением) адаптивных планов (программ) управления переходом СТС из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние. При этом рассматриваемые планы должны обеспечивать такое эволюционное развитие СТС, при котором наряду с реализацией программ перехода из соответствующих макросостояний предусматривается одновре-

менно и реализация программ устойчивого управления СТС в промежуточных макросостояниях.

На втором этапе исследования задачи выбора оптимальных программ УСД СТС приходится решать целую совокупность частных задач многоуровневой и многоэтапной оптимизации. Обобщенный алгоритм решения данных задач должен включать следующие шаги.

Шаг 1. Осуществление в интерактивном режиме автоматизированной подготовки, контроля, анализа и ввода всей исходной информации, необходимой для решения задачи управления структурной динамикой СТС. При этом одновременно проводится адаптация параметров и структур ранее построенных моделей, алгоритмов и соответствующих вычислительных модулей специального программно-математического и информационного обеспечения (СПМО и ИО) имитационной системы (ИС) к прошлому и текущему состоянию внешней среды, объектов управления и управляющих подсистем, входящих в состав функционирующей и синтезируемой СТС. При отсутствии требуемых исходных данных происходит их генерация либо с использованием соответствующих имитационных моделей, входящих в состав ИС, либо на основе экспертного опроса.

Шаг 2. Планирование проведения комплексного моделирования процессов адаптивного управления функционированием и развитием СТС в текущей и прогнозируемой обстановке, планирование проведения вычислительных экспериментов в ИС, определение состава и структуры моделей, методов и алгоритмов решения частных задач моделирования, расчет времени, необходимого для решения указанных задач.

Шаг 3. Генерирование на основе комплексного моделирования допустимых вариантов функционирования СТС в исходном, промежуточных и требуемых многоструктурных макросостояниях, вывод результатов моделирования ЛПР, предварительный интерактивный структурно-функциональный анализ указанных результатов моделирования; формирование классов эквивалентных многоструктурных макросостояний СТС.

Шаг 4. Автоматизированный ввод допустимых вариантов функционирования СТС, проверка корректности заданной системы ограничений, окончательный выбор необходимого уровня агрегирования при описании моделей УСД СТС, вычислительной схемы и плана вычислительных экспериментов по поиску оптимальных программ УСД СТС.

Шаг 5. Поиск оптимальных программ управления структурной динамикой СТС, при которых обес-

печивается переход из заданного в синтезируемое многоструктурное макросостояние СТС, устойчивое управление функционированием СТС в промежуточных многоструктурных макросостояниях.

Шаг 6. Имитация условий реализации оптимального плана управления переходом СТС из текущего в требуемое (выбранное) макросостояние при наличии возмущающих воздействий и с учетом различных вариантов их компенсации на основе методов и алгоритмов оперативного управления.

Шаг 7. Структурная и параметрическая адаптация плана к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям ОУ, УП, внешней среды. В ходе указанной адаптации вводится также необходимый уровень структурной избыточности СТС, обеспечивающий компенсацию не предусмотренных в плане возмущающих воздействий.

После проведения требуемого числа вычислительных экспериментов оценивается устойчивость сформированного адаптивного плана УСД СТС.

Шаг 8. Вывод полученных результатов комплексного адаптивного планирования применения СТС, их интерпретация и коррекция ЛПР.

Шаг 9. Реализация программ УСА СТС (в случае необходимости осуществляется коррекция указанных программ, перепланирование, расчет и реализация программ реконфигурации соответствующих структур и т. п.).

Одно из главных достоинств предлагаемого метода поиска оптимальных программ УСД СТС состоит в том, что в ходе формирования вектора программных управлений в финальный момент времени мы, наряду с оптимальным планом, одновременно получаем и то искомое многоструктурное макросостояние, находясь в котором СТС сможет выполнять поставленные перед ней задачи в складывающейся (прогнозируемой) обстановке с требуемой степенью устойчивости.

В результате проведенных исследований были разработаны и обоснованы комбинированные методы и алгоритмы решения задач выбора оптимальных программ УСД СТС в централизованном и децентрализованном режимах ее функционирования [11, 17, 23, 25]. В качестве базового, комбинированного метода предложено использовать сочетание метода ветвей и границ и метода последовательных приближений.

В заключение отметим, что изложенные в статье соображения о возможных путях развития кибернетики рассматриваются авторами как продолжение дискуссии, открытой на страницах международного научно-технического журнала "Проблемы управления и информатики" 2001, № 3, в статье

Н. Н. Дидука и В. Н. Коваля "Существует ли наука кибернетика? (О роли кибернетики в естествознании)". Наша первая реакция на эту дискуссию была отражена в опубликованной в этом журнале (2001, № 6) статье Юсупова Р. М. и Полонникова Р. И. "Воспримет ли кибернетику XXI век?". На этот вопрос в данной статье мы фактически даем положительный ответ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 07-07-00169, 0-07-00066), РГНФ (грант 09-02-00636), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 0-2.3/03), СПб НЦ РАН.

Список литературы

1. **Бир С.** Кибернетика и менеджмент. М.: УРСС, 2007.
2. **Бир С.** Мозг фирмы. М.: УРСС, 2005.
3. **Бирюков Б. В.** Кибернетика: прошлое для будущего. М.: Наука, 1981.
4. **Винер Н.** Кибернетика и общество. М.: Издательство иностранной литературы, 1958.
5. **Винер Н.** Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1958.
6. **Вонт Р., Перинг Т., Тенненхау Д.** Адаптивные и проактивные компьютерные системы // Открытые системы. 2003. Октябрь.
7. **Гаазе-Рапопорт М. Г.** Куда идет кибернетика // Кибернетика. Дела практические. М.: Наука, 1984.
8. **Герасименко В. А.** Информатика и интеграция в технике, науке и познании // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 5. С. 22—42.
9. **Информатика** в понятиях и терминах / Г. А. Бардовский, В. А. Извозчиков, Ю. В. Исаев, В. В. Морозов. Под ред. В. А. Извозчикова. М.: Просвещение, 1991.
10. **Информатика.** Энциклопедический словарь для начинающих / Под общей ред. Д. А. Пospelова. М.: Педагогика-Пресс, 1994.
11. **Калинин В. Н.** Современная космическая кибернетика — методологические основы и направления исследования // Информатика и космос. 2007. № 3. С. 7—16.
12. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 56—61.
13. **Колесников А. А.** Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006.
14. **Красовский А. А.** Науковедение и состояние современной теории управления техническими системами // Изв. АН. Теория и системы управления. 1998. № 6. С. 16—24.
15. **Крылов С. М.** Неокибернетика: Алгоритмы, математика эволюции и технологии будущего. М.: Издательство ЛКИ, 2008.
16. **Кузнецов Н. А.** Фундаментальные основы инфокоммуникаций. Доклад на 1-й Российской мультikonференции по проблемам управления. 10—12 октября 2006 г., Санкт-Петербург.
17. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
18. **Панкратова Н. Д., Курилин Б. И.** Концептуальные основы системного анализа рисков в динамике управления безопасностью сложных систем // Проблемы управления и информатики. 2000. № 6. С. 110—132 (Ч. 1); 2001. № 2. С. 108—126 (Ч. 2).
19. **Полонников Р. И.** Феномен информации и информационного взаимодействия. СПб.: СПИИРАН, 2001.
20. **Редько В. Г.** Эволюционная кибернетика. М.: Наука, 2003.
21. **Резников Б. А.** Системный анализ и методы системотехники. МО СССР, 1990.
22. **Ростовцев Ю. Г., Юсупов Р. М.** Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования // Известия вузов. Приборостроение. 1991. № 7. С. 7—14.
23. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальная и теоретико-множественная модель управления структурной динамикой космических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 5. С. 17—25.
24. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 5—16.
25. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. № 5. С. 103—117.
26. **Тимофеев А. В., Юсупов Р. М.** Интеллектуальные системы управления // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 5.
27. **Управление риском: Риск. Устойчивое развитие.** Синергетика / Под общ. ред. серии И. М. Макарова. М.: Наука, 2000.
28. **Фрадков А. Л.** Кибернетическая физика. СПб.: Наука, 2004.
29. **Хищенко В. Е.** Самоорганизация: элементы теории и социальные приложения. М.: КомКнига, 2005.
30. **Черняк Л.** От адаптивной инфраструктуры — к адаптивному предприятию // Открытые системы. 2004. № 9. С. 30—35.
31. **Юсупов Р. М., Иванищев В. В., Костельцев В. И., Суворов А. И.** Принципы квалиметрии моделей // Тез. докл. IV Междун. конф. "Региональная информатика-95". СПб. 1995. С. 90—91.
32. **Юсупов Р. М.** К 90-летию академика Е. П. Попова // Информационно-управляющие системы. № 1. 2005. С. 51—57.
33. **Юсупов Р. М., Гаскаров Д. В.** и др. Введение в геофизическую кибернетику и экологический мониторинг / Под общей редакцией Р. М. Юсупова. СПб.: СПбГУВК, 1998.
34. **Юсупов Р. М., Заболотский В. П.** Научно-методологические основы информатизации. СПб.: Наука, 2001.
35. **Юсупов Р. М., Соколов Б. В.** Проблемы развития кибернетики и информатики на современном этапе // Кибернетика и информатика. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. С. 6—21.
36. **Foerster von H.** Cybernetics. Encyclopedia of Artificial Intelligence. John Wiley and Sons, 1987.
37. **Foerster von H.** Cybernetics of Cybernetics, paper delivered at 1970 annual meeting of the American Society for Cybernetics. University of Illinois, Urbana, 1974.
38. **Maruyama M.** The Second Cybernetics. Deviation Amplifying mutual causal process // American Scientist. 1963. № 51.
39. **Heikki Hyötyniemi.** Neocybernetics in Biological Systems. Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Report 151, August 2006. 273 p.

Кузнецов Н. А., акад. РАН, д-р техн. наук, проф.,
Гречишкина Н. А., канд. филос. наук, ст. науч. сотр.,
nata19682A@cplire.ru,

Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН,
Московский физико-технический институт

Системы управления нанообъектами

Дан краткий обзор методов информационного обеспечения, методов принятия решений, методов управления ограниченными ресурсами и методов анализа устойчивости распределенных систем управления нанообъектами.

Ключевые слова: наносистемы, управление, информационное обеспечение.

Структура и алгоритмы функционирования систем управления зависят от объекта управления. С развитием технологий создания объектов автоматизации изменялись структура и алгоритмы функционирования систем управления. Двадцатый век был эрой создания крупных технологических объектов: промышленных комплексов (нефтехимических, металлургических и т. д.), больших средств передвижения (самолетов, кораблей и т. д.). Для создания систем автоматизации управления этими объектами были разработаны структура и методы построения иерархических систем управления и их информационного обеспечения. Характерной особенностью этих систем являлось постоянство их структуры и постоянство информационных потоков в них. Двадцать первый век — это век новых технологий создания объектов, век нанотехнологий.

Нанотехнологии — это любые технологии создания объектов, потребительские свойства которых определяются необходимостью контроля и манипулирования отдельными наноразмерными объектами (наноразмерный объект — атом, молекула, надмолекулярное образование).

Нанотехнологии развиваются в трех направлениях:

- изготовление электронных схем (в том числе и объемных) с активными элементами, размеры которых сравнимы с размерами молекул и атомов;
- разработка и изготовление наномашин;
- манипуляция отдельными атомами и молекулами и сборка из них макрообъектов.

Для современного этапа развития науки и технологий характерно создание нано- и микрообъектов, технологически сложных и динамически изменяющихся. По существу, речь идет о создании систем

взаимодействующих объектов. Для систем информационного обеспечения и управления такими объектами характерной структурой является сетевая структура, причем состав и архитектура сети может изменяться в процессе функционирования системы.

Отличительными особенностями таких систем являются также распределенность по различным узлам сети информации о внешней среде и состоянии отдельных узлов сети, относительная децентрализация принятия решений и наличие локальных систем автоматизации в отдельных узлах или совокупности узлов.

В данной статье дан краткий обзор методов построения систем информационного обеспечения, принятия решений и управления, которые позволяют решать перечисленные выше задачи.

Mesh-сети и сенсорные сети

Развитие нанообъектов неизбежно будет связано с созданием сетевых структур, взаимодействующих с внешней средой. Создание "систем на кристалле" позволит добиться новых перспектив в разработке и реализации так называемых *mesh-сетей*, т. е. сетей, главным принципом построения которых является принцип самоорганизации архитектуры сети, и *сенсорных сетей*, т. е. сетей, отдельный узел которых может содержать сенсоры, взаимодействующие с окружающей средой (т. е. обрабатывать информацию и принимать решения).

Принцип самоорганизации архитектуры представляет такие возможности, как устойчивость сети при выходе из строя отдельных ее компонентов, реализация топологии сети "каждый с каждым", динамический контроль состояния сети, динамическая маршрутизация трафика, изменение зоны информационного покрытия в режиме самоорганизации. Именно эти свойства делают технологию построения сетей по принципу mesh-сетей привлекательной и востребованной. Подтверждением этому служит то обстоятельство, что ведущие мировые телекоммуникационные компании, занимающиеся разработкой и производством сетевого оборудования и программного обеспечения для него, уже представили реализации mesh-сетей и оборудования для них, несмотря на то, что стандарта таких сетей еще не существует.

Существующие реализации телекоммуникационных сетей, организованных по принципу mesh-сетей, причем как мобильных (в качестве узлов такой сети могут использоваться карманные компьютеры, мобильные телефоны и т. д.), так и стационарных беспроводных сетей, дают основание говорить

о больших возможностях и широких перспективах, появляющихся вследствие такой организации сетей и обеспечивающих существенный прогресс в этой области. Причинами этому служат следующие факторы [1]:

- независимость беспроводной mesh-сети от существующих на месте инфраструктур, в том числе с точки зрения безопасности и защищенности информации;
- динамическая маршрутизация трафика обеспечивает простоту настройки сети, т. е. для включения устройства в сеть теоретически достаточно просто поместить устройство в зону покрытия сети;
- децентрализованность сети позволяет поддерживать только свою часть сети (как программное обеспечение, так и платформы);
- благодаря mesh-топологии и динамической маршрутизации в сети может быть обеспечена высокая стабильность работы сети по отношению к сбоям единичных узлов и отдельных соединений;
- высокие показатели реализации mesh-сетей с точки зрения решения проблем энергосбережения: мобильные устройства постепенно улучшают свои характеристики и комплектуются все более емкими батареями, а беспроводные интерфейсы к мобильным устройствам соответствуют им по показателям энергопотребления, так что mesh-сеть, развернутая на мобильных устройствах, может вообще не нуждаться в постоянном энергоснабжении на месте работы.

Самой известной фирмой, занимающейся mesh-сетями в мире, является "Tropos® Networks". На ее счету внедрение более 500 проектов в Америке и по всему миру своего решения MetroMeshE. Ярким примером внедрения может служить сеть Google WiFi, работающая год и объединяющая более 400 маршрутизаторов в опорной сети, покрывающая более 12 квадратных миль и 25 тысяч домов для обслуживания 15 тысяч пользователей.

Microsoft предложила свою схему работы и реализацию беспроводных mesh-сетей общего пользования довольно давно. С 2001 г. работниками фирмы по данной тематике опубликовано более 20 работ.

Американская компания "PHAZAR CORP", специализирующаяся на производстве радиооборудования, создает оборудование и программное обеспечение для mesh-сетей. Утверждается, что их технологии позволяют легко интегрироваться в существующую Ethernet-сеть и что эти технологии совместимы со всеми существующими протоколами. Основное применение данное оборудование находит в военной

отрасли, при ликвидации чрезвычайных ситуаций и аналогичных местах, где необходимы сети быстрого развертывания.

Компания "iVolve" производит и продает оборудование для беспроводных сетей специального назначения. Оно предназначено для использования на карьерной и рудодобывающей технике, тяжелой транспортной технике. Построенная сеть обеспечивает покрытие для клиентов и ориентирована на менеджеров с КПК и ноутбуками. Также ее особенностью является возможность интеграции с компьютерами на карьерной технике, что позволяет через встроенную GPS-систему собирать информацию о местоположении этой техники. Предусмотрена своя система менеджмента и настройки такой сети. Предполагается, что она будет удобна для сбора статистики и оптимизации работы техники.

Другим новым технологическим направлением, перспективное воздействие которого на все сферы жизни можно назвать революционным, является создание сенсорных сетей, т. е. сетей, каждый узел которых связан с внешней средой с помощью датчика, поставляющего информацию. Обработка поступающей информации может проводиться как централизованно, так и децентрализованно. Принципиальным отличием сенсорной сети от сетей прежнего поколения является то обстоятельство, что если раньше элемент сети использовался только для передачи информации, то теперь каждый узел сети может не только передавать информацию, но и взаимодействовать с окружающей средой, обрабатывать информацию и принимать решения. По сути дела, сенсорная сеть представляет собой интеллектуальную систему взаимодействия с внешней средой.

Для развития сенсорных технологий, так же, как для развития компьютерной техники, громадное значение имеют, конечно, новые технологии в создании передовых технических устройств, делающих реализацию этих грандиозных идей возможным.

Так, например, при работе сенсорной сети требуется длительное функционирование отдельных узлов сети без замены источников питания. Поэтому при разработке технических устройств (приемопередатчиков) большое внимание уделяется оптимальному решению проблем энергосбережения. В целях обеспечения максимального энергосбережения создаются различные режимы функционирования разрабатываемых устройств, при комбинации которых потребности в энергопотреблении минимальны. Кроме того, важной задачей является миниатюризация самих датчиков. Взаимодействие может быть осуществлено путем использования беспроводных сенсорных технологий с малым ра-

диусом действия. Создание нового научно-технического потенциала в области систем и средств беспроводной связи во многом связано с развитием важного направления радиосвязи — сверхширокополосного радио, а создание сенсорных сетей с использованием сверхширокополосных систем связи открывает гигантские перспективы для применения в самых разных сферах, поскольку мощность излучения сверхширокополосных устройств связи несравненно мала, и энергия, излучаемая такой системой на передаваемый бит информации меньше 1 нДж (для примера: для передачи одного бита информации сотовый телефон излучает $10^{-7} \dots 3 \cdot 10^{-7}$ Дж, передатчик Wi-Fi — 10^{-8} Дж, передатчик Bluetooth — $10^{-9} \dots 10^{-8}$ Дж, а сверхширокополосный передатчик $10^{-12} \dots 10^{-10}$ Дж). Таким образом, речь идет о нанорadiотехнологиях, поскольку уровень излучаемой энергии на бит передаваемой информации сверхнизок. Помимо ряда радиофизических проблем, связанных с генерацией сигналов очень малой мощности (компактность антенны, распространение сигналов в специфических средах на малые расстояния, эффективный прием с малыми энергетическими затратами), при широком использовании беспроводной связи возникает другой класс задач, которые могут быть успешно решены посредством реализации сенсорных сетей. Эти проблемы взаимных помех, создаваемых радиосредствами, могут быть решены посредством использования всего радиодиапазона и, главным образом, на основе анализа ситуации, т. е. анализа окружающей радиосреды, можно найти наиболее эффективный способ и протокол связи. Таким образом, радиосистема должна быть достаточно интеллектуальной, чтобы уметь извлекать из радиосигналов и анализировать информацию об окружающем радиопространстве, уметь предсказывать изменения канала связи и адаптировать свои внутренние параметры к изменениям радиосреды.

Коллективное принятие решений

Создание mesh-сетей, появление наносистем, прогресс в области программирования и значительный рост мощности компьютеров обусловили рост интереса к проблемам коллективного принятия решений и, в частности, к задачам коллективного распознавания. Суть задачи коллективного принятия решений состоит в "выработке согласованного коллективного решения о порядке предпочтения рассматриваемых объектов на основе индивидуальных мнений членов коллектива" [24, 43]. К общей проблеме коллективного принятия реше-

ний относятся задачи: коллективного распознавания, задачи группового выбора [15, 16, 17, 18], задачи теории голосования [15, 16, 18, 19] и др., методы обработки экспертных оценок [16, 20, 21, 22, 23] и др. [43].

"Под коллективным принятием решений, в частности, коллективным распознаванием понимается задача использования множества классификаторов, каждый из которых принимает решение о классе одной и той же сущности, ситуации, образа и т. п. с последующим объединением и согласованием решений отдельных классификаторов с помощью того или иного алгоритма" [43]. В современном виде проблема коллективного распознавания была поставлена впервые в 70-е годы прошлого века [24, 26, 27, 28, 29, 43]. Поскольку до сего дня практически не существовало никаких прикладных задач, в решении которых выявились бы преимущества предложенных идей и методов, то активное развитие теоретических и прикладных исследований в этой области заметно только сейчас.

В современной зарубежной литературе задачи, методы и алгоритмы коллективного распознавания встречаются в различных работах под разными названиями [30, 31], и разнообразие используемой терминологии отражает значительное разнообразие постановок задач и предположений, типы выходов классификаторов, стратегии объединения и т. п. [43]:

- объединение множества классификаторов (Combination of multiple classifiers);
- объединение классификаторов (Classifier fusion);
- объединение экспертов (Mixture of experts);
- метод комитетов (Committees);
- согласованная агрегация (Consensus aggregation);
- голосующее множество классификаторов (Voting pool of classifiers);
- динамический выбор классификатора (Dynamic classifier selection);
- составные системы классификации (Composite classifier system);
- комбинирование решений (Decision Combining);
- классификаторы типа "разделяй и властвуй" (Divide-and-conquer classifiers).

Основными задачами управления в сетевой структуре являются: сбор и анализ данных, принятие на этой основе решения, а также выполнение этого решения.

Главные задачи, возникающие на этом пути, а именно, уменьшение сложности решаемой задачи и повышение компетентности принятия решений, могут быть разрешены с использованием коллектива решателей, т. е. коллективное принятие реше-

ния является предпочтительным или даже единственно возможным. Таким образом, использование множества классификаторов и объединение их решений необходимо, и объясняется это различными причинами. Во-первых, входные данные имеют сложную специфику: собираются множеством распределенных сенсоров, которые могут принадлежать разным собственникам, и централизованная обработка этих данных не приветствуется; пространство признаков весьма широко (непрерывные, текстовые, изображения и т. п.), для них не существует алгоритмов совместной обработки в интересах принятия решений; разным признакам соответствуют разные уровни обобщения; необходимо уменьшить вычислительную сложность задачи, возникающую вследствие большой размерности пространства признаков.

Кроме того, необходимость использования множества классификаторов может быть обусловлена также свойствами конкретного приложения и основной целью задачи классификации.

Существует много различных методов распознавания и классификации: статистические методы; синтаксические методы, включающие формализацию модели классификации в терминах теории автоматов; методы теории формальных грамматик; структурные методы, использующие модели теории графов; нейросетевые подходы; методы, обучающиеся в реальном времени и другие. Тем не менее, следует заметить, что не существуют модель и метод классификации, которые были бы эффективно применимы для всех приложений. Возникло понимание того факта, что лучше использовать множество различных классификаторов и некоторым образом объединить их решения, т. е. целью является не определение оптимального признакового пространства и эффективного классификатора, а поиск наилучшего множества классификаторов и выбор лучшего метода объединения.

Объединение решений не является тривиальной задачей и представляет собой особую проблему в области распознавания и классификации, которая не сводится к обычной задаче классификации (с одним классификатором). Решение этой проблемы имеет много различных стратегий и подходов, и, тем не менее, исследование этих задач продолжает оставаться интересным.

К началу XXI века возникла принципиально новая идея в области коллективного распознавания и классификации — идея объединения решений на основе парных взаимодействий решателей, когда вместо иерархической структуры решателей используется их равноправное взаимодействие. В совре-

менной зарубежной литературе такой подход называется *"Peer-To-Peer" (P2P) классификацией*.

В целом существуют следующие группы подходов:

1) вероятностные, основанные на классическом правиле Байеса и его различных упрощениях;

2) группа методов объединения решений, использующих кооперацию классификаторов на уровне метаданных. В зарубежной литературе они называются методами, построенными на основе "стекового обобщения" ("stacked generalization");

3) группа методов, основанных на понятии областей компетентности классификаторов и использовании процедур, позволяющих оценивать компетентность классификаторов по отношению к каждому входу системы классификации;

4) методы объединения решений, основанные на применении нейросетевых технологий;

5) P2P-методы вычислений и объединения решений в схеме, в которой классификаторы не структурированы иерархически, а взаимодействуют попарно [43].

Мультиагентные системы

Развитие информационных технологий и возможность создания компьютерных систем нового поколения — самоорганизующихся распределенных сетей, состоящих из взаимодействующих автономных подсистем и обладающих высокой производительностью, открытостью, гибкостью и интеллектуальностью, — вызвало интерес к исследованиям в области мультиагентных технологий, которые по своей значимости постепенно выходят на уровень нано- и биотехнологий (www.agentlink.org). Это научное направление, зародившееся в середине 70-х годов прошлого века в сфере исследований искусственного интеллекта, постепенно завоевало одну из ведущих позиций в области информационных технологий в целом, о чем свидетельствуют сотни международных научных семинаров и конференций, посвященных этим проблемам, а также множество публикаций на эту тему. С 1997 г. издается журнал *"Autonomous Agents and Multi-agent Systems"* (Kluwer Publishers).

Теория мультиагентных технологий предлагает новый взгляд на разработку и создание крупных информационных приложений, характерными свойствами которых являются распределенность и открытость.

Что представляет собой мультиагентная система? Это сеть агентов (решателей), способных решать такие проблемы, которые не под силу ни одному из агентов в отдельности. Централизованное управле-

ние агентами отсутствует или ограничено; агенты имеют неполную информацию по решению "своей" проблемы и об окружающей среде. Используемые агентами данные децентрализованы, кроме того, агенты функционируют в асинхронном режиме.

В создании информационных и управляющих систем использование мультиагентных технологий обладает несомненной эффективностью. Исследователи выделяют несколько наиболее важных обстоятельств, являющихся подтверждением этому.

Масштабность задач, решаемых в рамках современных приложений в области управляющих систем, не допускает приемлемой возможности централизованной реализации и эффективного использования традиционных методов декомпозиции и координации. Кроме того, благодаря асинхронности и параллельности вычислений можно достичь существенного улучшения вычислительной эффективности прикладных задач. Благодаря технологии мультиагентных систем, когда определены технологии взаимодействия агентов, когда созданы специальные языки общения агентов и интерфейс стандартизирован, есть возможность использования одних и тех же программных компонентов для решения различных задач.

В случае пространственно распределенных источников данных, как, например, в сенсорных сетях, или в случае распределенности экспертов (например, в решении задач телемедицины) применение технологии мультиагентных систем делает возможность принятия решения реальной.

Применение мультиагентных технологий позволяет создать эффективно функционирующие программные системы, моделирующие поведение живых систем, в том числе с участием человека, например, составляющие различные расписания, когда система заменяет работу реальных людей по решению этих проблем, или организующие работу логистической компании. Каждому ресурсу или заказу транспортной компании в соответствие ставится программный агент; агент способен оценивать окружающую ситуацию, способен принимать решения и координировать эти решения с другими агентами. В отличие от традиционных громоздких, централизованных, последовательных программных систем пакетной оптимизации мультиагентная система для оптимизации ресурсов представляет собой распределенное самоорганизующееся сообщество небольших программных агентов-оптимизаторов, действующих параллельно и на основе переговоров и потому способных гибко и быстро реагировать на любые события, разрешая конфликты и перестраивая сеть своих связанных расписаний под действием

внешних событий в реальном времени [45, 46, 47]. В задачах динамического распределения и планирования ресурсов с применением классических методов оптимизации при возникновении непредвиденных событий план строится всякий раз заново. С применением технологий мультиагентных систем по мере появления событий в реальном времени план только корректируется путем переговоров между агентами, отвечающих за интересы заказов и ресурсов. Планировщики легко интегрируются с системами спутниковой ГЛОНАСС/GPS-навигации, базами данных о движении в городе, информационно-коммуникационными устройствами мобильной связи, включая сотовые телефоны с возможностью определения географических координат объекта, электронными картами местности (GoogleMap и Яндекс.Карты, Map24, MapPoint и MapInfo) с встроенными функциями поиска оптимальных маршрутов с учетом знаков ГИБДД и сезонной пропускной способности дорог, а также другими Интернет-сервисами. Созданные компаниями "Генезис знаний" и "Magenta" планировщики внедрены в таких известных в мире компаниях, как Tankers International (Лондон, Великобритания) — для управления крупнейшим в мире танкерным флотом, Addison Lee (Лондон, Великобритания) — для управления самым большим парком корпоративных такси в Лондоне, Gist (Манчестер, Великобритания) — для управления одним из крупнейших в Англии парком грузовиков, Avis (Ливерпуль, Великобритания) — для управления сдачей машин в аренду этого признанного лидера данного бизнеса, а также в ряде других [32].

Роль мультиагентных технологий в области информационных и управляющих систем, несомненно, будет возрастать. Важным здесь представляется вопрос об определении технологии взаимодействия агентов, т. е. о стандартизации интерфейсов и других компонентов агентов. Для этого разработано промежуточное программное обеспечение: специальные языки общения, протоколы координации поведения агентов и т. д. Кроме того, необходимо строго формальное описание самого агента, описание его функций, определяющих его внутреннее состояние и процессы взаимодействия агента с внешней средой, в том числе и с другими агентами. Математическая модель, лежащая в основе формального описания агента, может быть различной. Исследователи выделяют четыре основных типа моделей, для каждой из них существует большое разнообразие вариантов конкретной реализации [34, 44]:

1. Формальное описание моделей агентов и механизмы принятия решений основаны на принципах классической логики в терминах исчислений предикатов и механизмов дедуктивного вывода.

2. Формальной моделью агентов является конечный автомат, а решения принимаются на основе таблиц "ситуация—действие".

3. Модель агента, в которой внутренние состояния и принимаемые решения определяются структурами данных, представляющими собой предпочтения самого агента, т. е. так называемыми ментальными понятиями агента, а именно, убеждениями, желаниями и намерениями.

4. Многоуровневые модели, в которых описание агента и его действий проводится на разных уровнях абстракции, т. е. используются понятия различного уровня обобщения; на разных уровнях используются различные математические модели.

Анализ асинхронных систем

Как уже отмечалось, функционирование агентов в мультиагентной системе осуществляется в асинхронном режиме, т. е. мультиагентная система, по сути, представляет собой рассинхронизованную систему с дискретными элементами. Анализ динамики систем с дискретными элементами представляет важный раздел общей теории процессов управления. Понятие асинхронности или рассинхронизованности естественно возникает при описании функционирования многих систем дискретного типа. Рассмотрим систему W , состоящую из компонент (элементов, частей) $W_1, W_2, W_3, \dots, W_N$. Пусть состояние компоненты W_i описывается вектором $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$, $n_i \geq 1$, и изменяется в некоторые дискретные моменты в соответствии с правилом

$$x_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{iN}x_N + f_i, \quad (1)$$

где a_{ij} — матрицы соответствующих размерностей, а f_i — вектор внешних воздействий на компоненту W_i . Обозначим $\dots < T_{i,0} < T_{i,1} < \dots < T_{i,n} < \dots$ моменты изменения состояния компоненты W_i . Тогда изменение переменного состояния $x_i(t)$ компоненты W_i может быть описано уравнением

$$x_i(T_{i,n+1}) = a_{i1}x_1(T_{i,n}) + a_{i2}x_2(T_{i,n}) + \dots + a_{iN}x_N(T_{i,n}) + f_i(T_{i,n}), \quad (2)$$

где предполагается постоянство функций $x_i(t)$ на каждом интервале $T_{i,n} < t \leq T_{i,n+1}$. Из физических соображений естественно считать, что $T_{i,n} \rightarrow \infty$ при $n \rightarrow \infty$.

Моменты времени $T_{i,n}$ называются моментами коррекции компоненты W_i .

Если все компоненты подвергаются коррекции одновременно, т. е.

$$T_{1,n} = T_{2,n} = \dots = T_{N,n} \quad (-\infty < n < \infty),$$

то систему W_i назовем *синхронизованной*, в противном случае — *рассинхронизованной*.

Более удобна не непрерывная (2), а дискретная модель функционирования рассинхронизованной системы. В общем случае одновременно могут подвергаться коррекции несколько компонент системы W ; пусть $\omega \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$ — множество их номеров. Обозначим A_ω блочную матрицу, получающуюся из блочной матрицы $A = (a_{ij})$ заменой строк с номерами $i \notin \omega$ соответствующими строками единичной блочной матрицы I . Например, в случае, когда $\omega = \{i\}$, матрица A_ω имеет вид

$$A_\omega = \begin{pmatrix} I & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii} & \dots & a_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & I \end{pmatrix}.$$

Обозначим X — пространство состояний системы W , т. е. множество векторов $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, где $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$. Обозначим X_ω — линейное подпространство пространства X , состоящее из тех векторов $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, для которых $x_i = 0$ при $i \notin \omega$. Тогда изменение состояния системы W в общем случае описывается векторным равенством

$$x = A_\omega x + F_\omega,$$

где $F_\omega = \{f_1, f_2, \dots, f_N\} \in X_\omega$.

Пусть $\dots < T_0 < T_1 < \dots < T_n < \dots$ — все моменты коррекции всех компонент системы W .

Обозначим $x(n)$ — вектор состояния системы в момент T_n , а $\omega(n)$ — множество номеров подвергающихся в этот момент коррекции компонент. Тогда получаем следующее уравнение динамики системы W :

$$x(n+1) = A_{\omega(n)}x(n) + F(n), \quad F(n) \in X_{\omega(n)}.$$

Синхронизованной системе W в этом случае отвечает ситуация, когда $\omega(n) = \{1, 2, \dots, N\}$; динамика синхронизованной системы описывается уравнением

$$x(n+1) = Ax(n) + F(n).$$

Предположим теперь, что внешние воздействия на систему W отсутствуют. В этом случае $x = 0$ оказывается положением равновесия системы W , и естественно возникает вопрос о его устойчивости.

Системы с синхронно работающими элементами более просты в анализе. В распространенных ситуациях описание функционирования таких систем удается провести в терминах автономных разностных (или импульсных дифференциальных) уравнений. Методы анализа естественно возникающих при этом классов уравнений достаточно полно развиты. Описание динамики систем с несинхронно работающими элементами также может быть проведено в терминах разностных уравнений. Однако возникающие в этом случае разностные уравнения, как правило, оказываются неавтономными, причем зависимость правой части этих уравнений от времени лишь в частном случае систем с кратными периодами коррекции компонент может быть выражена в явном виде [80]. Даже в простейших ситуациях анализ соответствующих уравнений сопряжен с существенными трудностями.

Один из фактов, который необходимо учитывать при анализе рассинхронизованных систем, заключается в том, что сколь угодно малая рассинхронизация изначально синхронизованной системы может привести к качественному изменению ее динамики — сделать устойчивую систему неустойчивой и наоборот.

Если система рассинхронизована по фазе и частоте, то анализ ее устойчивости становится чрезвычайно трудной задачей. Какие-либо эффективные критерии устойчивости таких систем для общего случая авторам неизвестны.

Блестящие результаты, касающиеся устойчивости двухкомпонентных систем W , были получены А. Ф. Клепцыным [63, 64, 65, 66].

Одним из фундаментальных является вопрос об устойчивости положения равновесия системы с несинхронно работающими элементами. Работы Фань Чун-Вуй, опубликованные в 1958 г., и работы Jury E. I. (1963—67 гг.) показали, что классические приемы анализа устойчивости импульсных систем и отвечающих им разностных уравнений, основанные на преобразовании Лапласа или z -преобразовании, в случае систем с несинхронно работающими элементами малоэффективны. Формальным подтверждением интуитивного представления об усложнении анализа устойчивости систем при рассинхронизации работы их элементов явилась публикация Дж. Цициклиса (Tsitsiklis J. N) в 1987 г. В ней показано, что задача анализа устойчивости уравнений динамики систем с несинхронно работающими

элементами, вообще говоря, является NP-трудной, в то время как в случае систем с синхронно работающими элементами эта задача NP-трудной не является. Другое объяснение сложности анализа устойчивости систем с несинхронно работающими элементами, основанное на понятии алгебраической неразрешимости проблемы, дано Козякиным В. С. в 1990 г., и позднее распространено на более общую ситуацию неопределимости в o -минимальных структурах (2003 г.).

Одним из основных при анализе систем с несинхронно работающими дискретными элементами является вопрос о влиянии моментов коррекции состояния дискретных элементов на устойчивость системы. Здесь как по методам исследования, так и по получаемым результатам принципиально различаются три варианта. В первом из них дискретные элементы меняют свое состояние в некоторые известные моменты времени (синхронно либо несинхронно друг с другом). Второй вариант относится к случаю, когда известны вероятностные характеристики распределения моментов коррекции состояния дискретных элементов. Наконец, третий вариант имеет дело со случаем, когда никакой информации о закономерностях, описывающих моменты изменения состояния дискретных элементов, не имеется.

Примером систем, состояние дискретных элементов которых изменяется по известному закону, являются синхронизованные системы и системы с фазовой или частотной рассинхронизацией, характеризующиеся периодичностью коррекции состояния каждого дискретного элемента. Эти системы описаны в работах Клепцына А. Ф., Козякина В. С., Красносельского М. А., Кузнецова Н. А. в 1984—85 гг. Системы с фазочастотной рассинхронизацией возникают в технических приложениях; рассинхронизация по фазе имеет место, когда коррекция состояния дискретных элементов системы вызывается сигналами единого тактового генератора, а рассинхронизация по частоте имеет место тогда, когда коррекция состояния каждого дискретного элемента вызывается сигналами "своего" тактового генератора. Анализ устойчивости систем с фазовой рассинхронизацией в линейном случае сводится к анализу сходимости итерационной процедуры метода Гаусса-Зейделя. Анализ устойчивости систем с частотной рассинхронизацией сопряжен с существенными трудностями, не преодоленными в полной мере до сих пор. Значительный вклад в исследование этого случая внес в 1984—85 г. Клепцын А. Ф., которому удалось установить равномерность асимптотической устойчивости, а также пред-

ложить алгоритмы анализа устойчивости линейных систем, рассинхронизованных по частоте, состоящих из двух дискретных элементов. Позднее с привлечением идеи метода символической динамики Козякину В. С. в 1990 г. удается получить новые (простые и идейно прозрачные) доказательства результатов А. Ф. Клепцына, распространить и обобщить их на случай нелинейных систем. Другие приемы анализа устойчивости фазочастотно рассинхронизованных систем, использующие эргодические соображения, пригодные для анализа многокомпонентных систем, предложены в работах Клепцына А. Ф., Козякина В. С., Красносельского М. А., Кузнецова Н. А., Асарина Е. А. в 1984—85 гг.

В ряде работ Бертсекаса, Цициклиса и др. в 1982—88 гг. к исследованию систем с несинхронно работающими дискретными элементами привлечены вероятностные методы. В 1989 г. Асариным Е. А., Красносельским М. А., Кузнецовым Н. А. введено понятие стохастической рассинхронизации, исследованы закономерности распределения направления векторов состояния двухкомпонентных систем, установлен ряд признаков устойчивости стохастически рассинхронизованных систем.

В случаях, когда относительно моментов коррекции состояния дискретных элементов системы никакой информации не имеется, возникающие при анализе устойчивости математические постановки близки к постановкам классической проблемы абсолютной устойчивости (см. работы Айзермана М. А., Гантмахера Ф. Р., опубликованные в 1963 г.). Следует подчеркнуть, однако, что классы правых частей соответствующих разностных уравнений оказываются при этом весьма отличными от классов правых частей уравнений, традиционно изучаемых в теории абсолютной устойчивости. Это препятствует применению классических методов теории абсолютной устойчивости для анализа систем с несинхронно работающими элементами; возникающие трудности до известной степени удается преодолеть (как показано Козякиным В. С. в 1990 г.) с помощью подхода, развивающего идею принципа отсутствия ограниченных решений (см. работы Красносельского М. А., Покровского А. В., опубликованные в 1977—81 гг.). Вопросам построения общих критериев устойчивости уравнений, возникающих при анализе систем с несинхронно работающими элементами, посвящены также работы Р. Брайтона и К. Тонга (Brayton R. K., Tong C. H., 1980 г.). В них отправной точкой исследований явилось утверждение о том, что множество всех конечных произведений некоторого набора матриц ограничено тогда и только тогда, когда найдется

окрестность нуля, инвариантная относительно всех рассматриваемых матриц. Данный подход близок к известным теоремам Н. Н. Красовского о существовании функции Ляпунова, а также к теоремам об обращении принципа сжимающих отображений. Близкие подходы развивались в работах Д. Бертсекаса, Дж. Цициклиса (Bertsekas D. P., Tsitsiklis J. N.), Козякина В. С. в 1988—1991 гг.

В настоящее время наибольшее развитие получили две идеи разработки признаков устойчивости систем с несинхронно работающими элементами. Первая из них — конусная — использует теорему Перрона—Фробениуса о спектре матриц с положительными элементами. Некоторые признаки сходимости асинхронных вычислительных алгоритмов и устойчивости систем с несинхронно работающими элементами, основанные на конусной идее, получены в работах [83—88]. Другая — вариационная — идея основана на связи релаксационных итерационных алгоритмов с процедурами минимизации функционалов. Развитию вариационной идеи анализа сходимости итерационных процедур, близких к возникающим при анализе систем с несинхронно работающими элементами, посвящены работы, опубликованные в 1968 г. [81, 82]. Ряд эффективных признаков устойчивости систем с несинхронно работающими элементами, основанный на вариационной идее, получен Козякиным В. С. в 1990—92 гг.

Достаточно очевидной является связь теории рассинхронизованных систем с теорией потоков в сетях, теорией телекоммуникационных процессов, теорией функционирования сложных многопроцессорных комплексов и т. п. Однако в последние годы были обнаружены менее очевидные и во многом не понятые до сих пор взаимосвязи теории рассинхронизованных систем с теорией квазикристаллов (в работах Калугина П. А., Китаева А. Ю., Левититова Л. С., 1986 г.), с проблемами математической экономики (в работах Владимировой А. А., Козякина В. С., Мандельбаума А., Кузнецова Н. А., 1992 г.).

Особенностью рассинхронизованных систем является то, что они постоянно работают как бы в переходном режиме. Другие примеры такого рода систем доставляют гибкие производственные системы, системы адаптивного управления с большим уровнем внешних помех. В связи с этим возникает необходимость в разработке эффективных простых критериев, позволяющих оценивать амплитуды вектора состояния на всем временном интервале функционирования системы, включая как начальный интервал переходного режима, так и следующий

за ним бесконечный интервал режима "стремления к положению равновесия". В работах [60, 61, 74] была замечена одна существенная особенность поведения систем такого рода. Так, оказалось, что когда в системе "объект — регулятор" регулятор выбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить как можно более высокую степень устойчивости системы, то одновременно возрастают и выбросы переменного вектора состояния системы во время переходного режима, т. е. усиливается пик-эффект.

В работе [72] разработан подход, позволяющий достаточно эффективно и просто решить задачу оценки амплитуды вектора состояния системы на всем временном интервале. Оказалось, что значительную роль здесь играет так называемое свойство квазиуправляемости системы, близкое к понятию управляемости по Калману, но более слабое, чем последнее. Степень квазиуправляемости системы может быть охарактеризована некоторой числовой величиной, называемой мерой квазиуправляемости. Основным результатом работы [72] заключается в доказательстве (при достаточно общих предположениях) следующей альтернативы: квазиуправляемая система либо является неустойчивой, либо она устойчива, и тогда все траектории ее переменного вектора состояния, выходящие из единичного шара, в некоторой норме ограничены сверху величиной, обратной к мере квазиуправляемости. Учитывая, что мера квазиуправляемости может быть конструктивно вычислена, сформулированная альтернатива оказывается эффективным инструментом анализа переходных режимов систем управления. Важным для теории рассинхронизованных систем является факт, что рассинхронизованные системы в общем случае всегда квазиуправляемы.

Оказалось также, что квазиуправляемость тесно связана и со свойствами устойчивости или неустойчивости. Смысл этих взаимосвязей в том, что неустойчивость квазиуправляемых систем всегда экспоненциальная, причем это свойство робастно по отношению к малым возмущениям параметров системы.

Результаты по анализу пик-эффекта в рассинхронизованных системах (в работах Козякина В. С., Кузнецова Н. А., Покровского А. В., 1992 г.) позволили разработать эффективные критерии надежности функционирования рассинхронизованных систем. Новые вычислительные схемы, основанные на идее рассинхронизации, были предложены в работах Красносельского М. А., Красносельского А. М., Кузнецова Н. А. в 1991—92 гг.

В последние годы активно исследовалась связь динамики асинхронных и переключающихся

(switching) систем с так называемой проблемой вычисления обобщенного или совместного спектрального радиуса набора матриц. В теории управления и общей теории динамических систем обобщенный спектральный радиус используется для описания скорости сходимости или расходимости траекторий, описываемых произведениями матриц. Дж. Лагариас и Янг Ванг в 1995 г. высказали предположение о том, что обобщенный спектральный радиус конечного набора матриц всегда достигается на некотором конечном произведении матриц. Первый контрпример к этой "гипотезе о конечности" был построен Т. Бушем и Ж. Мерессом (2002 г.) а соответствующее доказательство существенно опиралось на конструкции теории меры. Позднее В. Блондель, А. Владимиров и Ж. Тэсс (2003 г.) представили доказательство контрпримера к гипотезе о конечности, основанное на комбинаторных свойствах перестановок произведений положительных матриц. В контексте задач и подходов теории управления упомянутые методы построения контрпримера к гипотезе о конечности оказываются не вполне удовлетворительными, поскольку они не дают достаточно конструктивного описания структуры траекторий с максимальной скоростью роста (или минимальной скоростью убывания). В связи с этим В. С. Козякиным в 2005 г. было предложено еще одно доказательство контрпримера к гипотезе о конечности, выполненное в духе теории динамических систем.

Построенные контрпримеры показывают, что гипотеза Лагариаса—Ванга о конечности не верна в самых простых ситуациях — для наборов, состоящих из пары двумерных неотрицательных матриц. В то же время все эти контрпримеры неконструктивны — это чистые "теоремы несуществования" и до сих пор не известно ни одного конкретного набора матриц, который опровергал бы гипотезу Лагариаса—Ванга.

В [54] проводилось численное моделирование влияния эффектов рассинхронизации на поведение систем управления. Рассматривалась система управления, состоящая из непрерывного объекта управления, дискретных измерительных устройств и дискретного регулятора, в которой моменты измерения фазовых координат и формирования управляющих воздействий различны. Объект управления описывался системой линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными матричными коэффициентами, удовлетворяющими условиям управляемости. Управляющие переменные являлись кусочно-постоянными и могли быть изменены только в моменты времени, кратные за-

данному временному интервалу. В течение этого интервала проводилось несколько измерений, в общем случае разнесенных по времени, линейных комбинаций фазовых координат объекта имеющимися скалярными измерителями. Такая система была названа асинхронной по измерениям в отличие от синхронной системы, когда все возможные измерения проводятся в момент изменения управляющих воздействий, выработанных на основе этих измерений. Кроме вопросов эквивалентности синхронных и асинхронных по измерениям систем в работе исследовалось отличие их динамик при аналогичном алгоритме формирования управления объектом, т. е. изменения степени их устойчивости при рассинхронизации. При решении задачи использованы методы теории возмущений. Получены аналитические оценки сдвигов собственных значений кратности единицы матрицы экстраполяции замкнутой непрерывной системы управления при переходе к дискретной синхронной системе и при дальнейшей ее рассинхронизации. Приведены примеры, иллюстрирующие эффективность использования оценок сдвигов собственных значений матрицы при рассинхронизации конкретных систем управления.

Следует отметить, что в случае, когда синхронная система устойчива, устойчивость рассинхронизованной системы можно обеспечить с помощью расширения фазового пространства по аналогии с корректирующими фильтрами в случае непрерывных систем [79].

Список литературы

1. **Вишневикий В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. Л.** Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005.
2. **Part 11:** Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: Mesh Networking // IEEE P802.11s/D1.08, January 2008.
3. **Part 11:** Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: Mesh Networking // IEEE P802.11s/D1.07, September 2007.
4. **Part 11:** Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: Mesh Networking // IEEE P802.11s/D1.06, July 2007.
5. **Part 11:** Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment: Mesh Networking // IEEE P802.11s/D1.00, November 2006.
6. **Part 11:** Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11, 1999 Edition, August 1999.
7. **Part 11:** Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications // IEEE Std 802.11-2007, June 2007.
8. **Clausen T. and Jacquet P.** Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) // IETF experimental RFC 3626, October 2003.
9. **Huang L. and Lai T. H.** On the scalability of IEEE 802.11 ad hoc networks // Proc. of ACM MobiHoc, 2002.

10. **Zhou D., Lai T. H.** Analysis and Implementation of Scalable Clock Synchronization Protocols in IEEE802.11 Ad Hoc Networks // Proc. of MASS, 2004.
11. **Vishnevsky V. M., Gorodov P. V., Shpilev S. A.** Performance analysis of RA-OLSR in IEEE802.11s mesh networks // International Workshop. Proc. Of Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2007). Vol. 1. Moscow, 2007.
12. **Schriber T. J.** Simulation using GPSS // John Wiley & Sons, 1974.
13. **Вишневикий В. М.** Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003.
14. **Held G.** Wireless Mesh Networking. New York. Taylor & Francis, 2005.
15. **Льюс Р., Райфа Х.** Игры и решения. М.: ИЛ, 1961.
16. **Миркин Б. Г.** Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974.
17. **Blin J., Fu K., Whinston A.** Application of Pattern Recognition to some Problems in 18. Economics // Techniques of Optimization. 1972. № 416. P. 1—18.
18. **Kanal L.** Interactive Pattern Analysis and Classification. Survey and Commentary // Proc. of IEEE, 1972. № 10. P. 1200—1215.
19. **Математические методы в социальных науках /** Под ред. Лазарфельда П. и Генри Н. М.: Наука, 1973.
20. **Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г.** Экспертные оценки. М.: Наука, 1973.
21. **Воробьев Н. Н.** Вопросы математизации принятия решений на основе экспертных оценок // Матер. IV симпозиума по кибернетике. 1972. Ч. 3. С. 47—51.
22. **Глушков В. М.** О прогнозировании на основе экспертных оценок // Кибернетика. 1969. № 2. С. 2—4.
23. **Дж. фон Нейман.** Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент // Автоматы, под ред. Шеннона К. Э. и Маккарти Дж. М.: ИЛ, 1956. С. 68—139.
24. **Растринин Л. А., Эренштейн Р. Х.** Метод коллективного распознавания. М.: Энергоиздат, 1981.
25. **Condorcet N. C.** Essaisur l'application de l'analyse a la probabilité des decisions rendues a la pluralité des voix. Paris: Imprimerie Royale, 1785.
26. **Растринин Л. А., Эренштейн Р. Х.** Коллектив алгоритмов для обобщения алгоритмов решения задач // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1978. № 2. С. 116—126.
27. **Растринин Л. А., Эренштейн Р. Х.** Принятие решений коллективом решающих правил в задачах распознавания образов // Изв. АН СССР. Автоматика и телемеханика. 1975. № 9. С. 134—144.
28. **Растринин Л. А., Эренштейн Р. Х.** Коллектив алгоритмов // Матер. Междунар. объедин. конф. по искусственному интеллекту. Москва, 1975. Т. 3. С. 138—144.
29. **Растринин Л. А., Эренштейн Р. Х.** Обучение коллектива решающих правил // Адаптивные системы. 1974. № 4. С. 8—20.
30. **Kittler J., Hatef M., Duin R. P. W., Matas J.** On combining classifiers // IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998. № 20 (3). P. 226—239.
31. **Kuncheva L., Bezdec J., Duin R. P. W.** Decision Templates for Multiple Classifier Fusion // Pattern Recognition, 2001. № 34 (2). P. 299—314.
32. **Skobelev P. O., Glashchenko A. V., Grachev I. A., Inozemtsev S. V.** MAGENTA Technology Case Studies of Magenta i-Scheduler for Road Transportation // Proc. of 7-th International Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems AAMAS 2007 — US, Hawaii, May 2007.
33. **Ferber J.** Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley Pub Co., 1999, 528 p.
34. **Weiss G. (Ed.).** Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press, 2000, 648 p.
35. **Wooldridge M.** An Introduction to Multi-agent Systems. J. Wiley & Sons, 2002. 366 p.
36. **Кнапик М. and Johnson J. B.** Developing Intelligent Agents for Distributed Systems: Exploring Architectures, Techniques, and Applications. Osborne McGraw-Hill, 1997. 389 p.
37. **Tecuci G.** Building Intelligent Agents: An Apprenticeship Multistrategy Learning Theory, Methodology, Tool and Case Studies. Academic Press, 1998. 320 p.

38. **Yokoo M.** Distributed Constraint Satisfaction: Foundations of Cooperation in Multi-Agent Systems Springer Verlag, 2001. 158 p.
39. **Wagner T., Rana O. (Eds.)**. Infrastructure for Agents, Multi-agent Systems, and Scalable Multiagent Systems. Springer Verlag, 2001. 319 p.
40. **Pitt J. (Ed.)**. Open Agent Societies: Normative Specifications in Multi-Agent Systems. J. Wiley & Sons, 2002.
41. **D'Inverno M. (Ed.)**. Foundation and Applications of Multi-agent Systems: UKMAS Workshops 1996—2000: Selected Papers. Lecture Notes in Computer Science. 2002. Vol. 2403.
42. **Городецкий В. И.** Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 1.
43. **Городецкий В. И., Серебряков С. В.** Методы и алгоритмы коллективного распознавания: обзор // Автоматика и телемеханика. 2008. № 11. С. 3—41.
44. **Городецкий В. И.** Многоагентные системы: Обзор // Автоматика и телемеханика (в печати).
45. **Скобелев П. О.** Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автоматика. 2002. № 6. С. 45—61.
46. **Виттих В. А., Скобелев П. О.** Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177—185.
47. **Rzevski G. A., Skobelev P. O.** Emergent Intelligence in Large Scale Multi-Agent Systems — Education and Information Technologies Journal, Issue 2. 2007. Vol. 1.
48. **Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Клецов А. В., Кузьмин Л. В., Лактюшкин А. М., Юркин В. Ю.** Сверхширокополосная беспроводная связь и сенсорные сети // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С. 1278—1289.
49. **Айзерман М. А., Гантмахер Ф. Р.** Абсолютная устойчивость регулируемых систем. М.: Изд. АН СССР, 1963.
50. **Асарин Е. А., Красносельский М. А., Кузнецов Н. А.** О динамике рассинхронизованных систем со случайными моментами коррекции компонент // Автоматика и телемеханика. 1989. № 6. С. 6—12.
51. **Asarin E. A., Kozjakin V. S., Krasnoselskii M. A., Kuznetsov N. A., Pokrovski A. V.** On some new types of mathematical models of complex systems // Lect. Notes in Contr. Sci. 1988. N 105. P. 10—26. 5.
52. **Белецкий В. Н.** Многопроцессорные и параллельные структуры с организацией асинхронных вычислений. Киев: Наукова думка, 1988.
53. **Биркофф Дж.** Динамические системы. М.: Гостехиздат, 1941.
54. **Борисов В. Г., Григорьев Ф. Н., Гулько Ф. Б., Кузнецов Н. А.** О рассинхронизованных по измерениям системах управления // Автоматика и телемеханика. 1997. № 7.
55. **Baudet G. M.** Asynchronous iterative methods for multi-processors // J. Assoc. Comput. Mach. 1978. Vol. 25. N 2. P. 226—244.
56. **Bertsekas P. P., Tsitsiklis J. N.** Parallel and distributed computation. Numerical methods. Englewood Cliffs, NJ, 1988.
57. **Chazan D., Miranker W.** Chaotic relaxation // Linear Algebra and Appl. 1969. N 2. P. 199—222.
58. **Farmer J. D., Ott E., Yorke J. A.** The dimension of chaotic attractors // Phys. D. 1983. D. P. 153—180.
59. **Furstenberg H., Kesten H.** Products of random matrices // Ann. Math. Stat. 1960. 31. P. 457—469.
60. **Izmaylov, R. N.** The peak effect in stationary linear systems with scalar inputs and outputs // Automation and Remote Control. 1987. Vol. 48. N 8. P. 1018—1024.
61. **Измайлов Р. Н.** Каноническое представление идентификатора состояния и оптимизация переходных режимов // Автоматика и телемеханика. 1989. № 4. С. 59—64.
62. **Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A.** Topics in mathematical system theory. New York, 1969. 347 p.
63. **Клепцын А. Ф.** Об устойчивости рассинхронизованных сложных систем специального вида // Автоматика и телемеханика. 1985. № 4. С. 169—172.
64. **Клепцын А. Ф., Козьякин В. С., Красносельский М. А., Кузнецов Н. А.** О влиянии малой рассинхронизации на устойчивость сложных систем // Автоматика и телемеханика. 1983. № 7. С. 44—51; 1984. № 3. С. 42—47; 1984. № 8. С. 63—67.
65. **Клепцын А. Ф., Козьякин В. С., Красносельский М. А., Кузнецов Н. А.** Устойчивость рассинхронизованных систем // Докл. АН СССР. 1984. Т. 274, № 5. С. 1053—1056.
66. **Kleptsyn A. F., Krasnoselskii M. A., Kuznetsov N. A., Kozjakin V. S.** Desynchronization of linear systems // Mathematics and Computers in Simulation. 1984. Vol. 26. P. 423—431.
67. **Козьякин В. С.** Алгебраическая неразрешимость задачи об абсолютной устойчивости рассинхронизованных систем // Автоматика и телемеханика. 1990. № 6. С. 41—47.
68. **Козьякин В. С.** Об устойчивости фазочастотно рассинхронизованных систем при возмущении моментов переключения компонент // Автоматика и телемеханика. 1990. № 8. С. 35—42.
69. **Козьякин В. С.** Об анализе устойчивости рассинхронизованных систем методами символической динамики // Докл. АН СССР. 1990. Т. 311, № 3. С. 549—552.
70. **Козьякин В. С.** Об абсолютной устойчивости систем с не-синхронно работающими импульсными элементами // Автоматика и телемеханика. 1990. № 10. С. 56—63.
71. **Козьякин В. С.** Абсолютная устойчивость рассинхронизованных систем // Доклады АН СССР. 1990. Т. 312, № 5. С. 1066—1070.
72. **Козьякин В. С., Покровский А. В.** Роль свойств типа управляемости в изучении устойчивости рассинхронизованных динамических систем // Докл. АН СССР. Т. 324. 1. С. 60—64.
73. **Lankaster P.** Theory of matrices. New York, 1969.
74. **Mita T. and Yoshida H.** (1980) Eigenvector assignability and responses of the closed loop systems // Transact. Soc. Instr. and Contr. Eng. 1980. Vol. 16. N 4. P. 477—483.
75. **Нестеренко Б. Б., Марчук В. А.** Основы асинхронных методов параллельных вычислений. Киев: Наукова думка, 1989.
76. **Tsitsiklis J. N.** On the stability of asynchronous iterative processes // Math. Systems Theory. 1987. N 20. P. 137—153.
77. **Walters P.** Ergodic theory. Introductory lectures // Lect. Notes in Mat. Berlin, 1982.
78. **Цыпкин Я. З.** Теория линейных импульсных систем. М.: Физматиздат, 1963.
79. **Рябых Н. Г.** Синтез устойчивых рассинхронизованных итерационных процессов методом пре- и пост-кодирования // Тр. 51-й науч. конф. МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук": Ч. I. Радиотехника и кибернетика. М.: МФТИ, 2008. С. 33—36.
80. **Клепцын А. Ф., Козьякин В. С., Красносельский М. А., Кузнецов Н. А.** Устойчивость рассинхронизованных систем // Докл. АН СССР. 1984. № 5. Т. 274. С. 1053—1056.
81. **Elkin R.** Convergence theorems for Gauss-Seidel and other minimization algorithms. Ph. D. Diss. College Park, 1968. 231 p.
82. **Schechter S.** Relaxation methods for convex problems // SIAM J. Numer. Anal. 1968. N 5. P. 601—612.
83. **Miellow J.-C.** Iterations chaotiques a retards // C. r. Acad. sci. A. 1974, Vol. 278. P. 957—960.
84. **Miellow J.-C.** Iterations chaotiques a retards, etudes de la convergence dans le cas d'espaces partiellement ordonnes // C. r. Acad. sci. A. 1975a, Vol. 280. P. 233—236.
85. **Miellow J.-C.** Iterations chaotiques a retards // Rev. automat. inform. et rech. operat. 1975b, Vol. 1. N 9. P. 55—82.
86. **Robert F.** Block H-matrices et convergence des methodes iteratives classiques par blocks // Linear Algebra and Appl. 1969. Vol. 2. N 2. P. 223—265.
87. **Robert F.** Methodes iteratives serie parallele // C. r. Acad. sci. A. 1970, Vol. 271. P. 847—850.
88. **Robert F.** Contraction en norme vectorielle: convergence d'iterations chaotiques pour des equations non lineaires de point fixe a plusieurs variables // Linear Algebra and Appl. 1976. N 13. P. 19—35.

И. А. Каляев,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., директор,

С. Г. Капустян, д-р техн. наук, нач. отдела,

Научно-исследовательский институт
многопроцессорных вычислительных систем
имени академика А. В. Каляева

Южного федерального университета,
kap@mvs.tsure.ru

Проблемы группового управления роботами

Рассматриваются проблемы группового управления роботами в различных условиях, в том числе при функционировании групп роботов в условиях динамически изменяющихся, недетерминированных ситуаций. Дается формальная постановка задачи группового управления роботами. Для решения данной задачи предлагается метод коллективного управления, суть которого заключается в том, что каждый робот группы самостоятельно определяет свои очередные действия, направленные на достижение коллективной цели наилучшим в текущей ситуации образом. В основу предлагаемого подхода положены принципы коллективного взаимодействия, используемые коллективами людей, выполняющих общую работу без руководителя или командира.

Ключевые слова: группа роботов, групповое управление, задача группового управления, недетерминированная ситуация, метод коллективного управления, итерационная процедура, оптимизация коллективных действий, стайная стратегия управления.

Введение

Роботы используются во многих областях науки, техники и промышленности, в первую очередь там, где жизнедеятельность человека либо затруднена, либо вообще невозможна, например, в зонах радиоактивного или химического загрязнения, в условиях боевых действий, при проведении подводных или космических исследований и т. п. Проблеме создания интеллектуальных роботов посвящено достаточно большое число исследований, проводимых как у нас в стране, так и за рубежом, начиная с середины 60-х годов прошлого века. В результате этих исследований достаточно хорошо проработаны основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться разработчикам при создании роботов, такие как распознавание объектов и сцен, формирование моделей окружающей среды, планирование маршрутов движения и последовательностей действий для достижения цели, управление движением с учетом динамики робота и т. д. Однако понятно, что одиночный робот не может быть использован для решения крупномасштабных задач, так как обладает сравнительно небольшими возможностями.

Очевидным решением указанных выше проблем является применение при решении сложных задач сразу нескольких роботов, т. е. групп роботов.

Преимущества группового применения роботов очевидны. Во-первых, это больший радиус действия, во-вторых, расширенный набор выполняемых функций и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них. Поэтому такие сложные задачи, как, например, масштабное исследование и зондирование поверхности других планет, сборка сложных конструкций в космосе и под водой, участие в боевых и обеспечивающих операциях, разминирование территорий и т. п., могут быть эффективно решены роботами только при их групповом взаимодействии.

Особую важность проблема группового взаимодействия роботов принимает в такой перспективной области современной робототехники, каковой является микроробототехника.

Вместе с тем, при групповом применении роботов возникает ряд новых проблем, и, прежде всего, это проблема организации взаимодействия роботов в группах при решении сложной целевой задачи и проблема коммуникации, связанная с организацией взаимодействия роботов.

Решение данных проблем позволит, во-первых, значительно расширить области применения роботов, во-вторых, вплотную приблизиться к решению проблемы массового применения микророботов в составе больших групп, насчитывающих тысячи и десятки тысяч микророботов. Применение групп роботов, способных выполнять сложные работы, например, при ликвидации последствий природных или техногенных катастроф, рост числа которых наблюдается в последнее время, в свою очередь, позволит снизить риск для людей в условиях вредных или даже опасных сред, сократить затраты, связанные с обеспечением безопасности, увеличить производительность предприятий и т. п.

Группой роботов будем называть совокупность однотипных (т. е. имеющих одинаковую конструкцию, одинаковое функциональное назначение и функциональные возможности, или разнотипных, имеющих разную конструкцию, разное функциональное назначение и, соответственно, разные функциональные возможности) роботов, объединенных общей целевой задачей. В первом случае группа называется *однородной* или *гомогенной*, а во втором — *неоднородной* или *гетерогенной*.

Для достижения конкретной цели, стоящей перед группой роботов, в случае детерминированной среды каждый робот может выполнять заранее оп-

ределенную последовательность действий. В случае же недетерминированной, динамической среды эта последовательность должна быть найдена системой управления группой роботов в процессе достижения цели. Причем действия роботов группы, очевидно, должны быть определенным образом скоординированы, согласованы. Таким образом, возникает задача управления группой роботов. Эта задача заключается либо в реализации системой управления роботами *заранее найденной* последовательности действий всех роботов группы, либо в отыскании такой последовательности и ее реализации в *процессе достижения* поставленной цели.

Примеры группового управления роботами

Проблема группового управления роботами возникла практически сразу, как только первые роботы появились на производственных предприятиях. Действительно, применение роботов эффективно только в случае, если их много и они выполняют, по крайней мере, большинство технологических операций. При этом они должны работать согласованно друг с другом и с другим технологическим оборудованием.

Простейший случай группового управления в робототехнике — это управление системой приводов одного манипулятора в целях обеспечения заданных перемещений его рабочего органа. На первых порах для этого использовалось централизованное, разомкнутое управление приводами. С ростом требований к точности изменения положений рабочего органа чаще всего используется централизованное управление непосредственно по его координатам, т. е. манипулятор оснащается соответствующими сенсорами. Управляющие воздействия на отдельные приводы рассчитываются в этом случае путем решения обратной задачи кинематики или динамики в зависимости от требуемого быстродействия манипулятора. В результате происходит переход к управлению "с ведущим", где роль последнего играет рабочий орган манипулятора (захват, звено с закрепленным инструментом и т. п.) [1–3].

С развитием адаптивного и интеллектуального управления роботами все более четко просматривается тенденция децентрализации за счет распределения между отдельными подсистемами робота или отдельными роботами группы задач обработки сенсорной информации, формирования моделей среды, базы знаний и т. д., т. е. тенденция применения методов распределенных вычислений и распределенного управления [4–8].

Следующая по сложности задача группового управления роботами — это координация их движе-

ния в пространстве. Простейший пример — предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Предельный случай — это работа манипуляторов на общем рабочем месте, например, в составе сборочного центра. В этом случае помимо обеспечения рабочих движений роботов система группового управления должна обеспечивать их безопасность, заключающуюся в исключении столкновений.

Более сложная задача группового управления — это обеспечение совместной работы нескольких манипуляторов с координацией их движений одновременно и в пространстве, и во времени, т. е. координация производственных траекторий движения манипуляторов в реальном масштабе времени [1, 3]. Примером может быть операция сборки различных узлов путем механического соединения деталей, одновременно перемещаемых несколькими манипуляторами.

Далее по сложности следует задача группового управления гибкими производственными системами, где промышленные роботы функционируют совместно с различным технологическим оборудованием, транспортной и складской системами. Общая тенденция развития систем управления такими комплексами заключается в прогрессивном ослаблении централизованного начала и переходе к распределенным гибким производственным системам, состоящим из объединенных локальной сетью технологических модулей и функциональных модулей, выполняющих общесистемные функции. В таких системах может отсутствовать единое планирование и диспетчеризация, а последовательность изготовления каждого очередного изделия определяется в процессе выполнения технологических операций исходя из текущей ситуации.

Наиболее сложная задача группового управления — это управление группой роботов в естественной неорганизованной среде (на поверхности Земли или других планет, в воде, воздухе, космосе) и, особенно, в условиях организованного противодействия со стороны объектов среды или других групп роботов (борьба двух или более групп).

Достижение цели, стоящей перед группой, осуществляется путем выполнения роботами некоторых действий. Для наиболее эффективного, оптимального достижения цели действия отдельных роботов группы, очевидно, должны быть согласованы, т. е. определенным образом скоординированы.

В дальнейшем именно задачу определения (распределения) групповых действий, направленных на оптимальное достижение групповой цели для краткости будем называть задачей группового управления.

Формальная постановка задачи группового управления роботами

Задача группового управления роботами может быть сформулирована следующим образом [9].

Пусть некоторая группа \mathfrak{R} , состоящая из N роботов R_j ($j = \overline{1, N}$), функционирует в некоторой среде E . Состояние каждого робота $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) в момент времени t описывается вектор-функцией $\mathbf{r}_j(t) = [r_{j,1}(t), r_{j,2}(t), \dots, r_{j,h}(t)]^T$ (h — число параметров состояния j -го робота). Состояние группы роботов \mathfrak{R} задается вектором $\mathfrak{R}(t) = [\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_N(t)]^T$. Состояние среды вокруг j -го робота в момент времени t описывается вектором $\mathbf{e}_j = [e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{w,j}(t)]^T$ (w — число параметров состояний среды вокруг j -го робота). Тогда состояние среды, в которой функционируют роботы рассматриваемой группы, при условии, что среда стационарна, в момент времени t описывается вектором $\mathbf{e}(t) = [\mathbf{e}_1(t), \mathbf{e}_2(t), \dots, \mathbf{e}_N(t)]^T$.

Роботы и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему "группа роботов — среда", под состоянием которой в момент времени t понимается состояние, описываемое парой $s_c = \langle \mathfrak{R}, \mathbf{e} \rangle$. Множество различных состояний системы "группа роботов — среда" описывается точками $N(h + w)$ -мерного пространства состояний $\{s_c\}$. Под начальным и конечным (целевым) состояниями системы "группа роботов — среда" понимаются состояния

$$s_c^0 = \langle \mathfrak{R}^0, \mathbf{e}^0 \rangle, s_c^f = \langle \mathfrak{R}^f, \mathbf{e}^f \rangle \quad (1)$$

соответственно.

Состояние системы "группа роботов—среда" $s_c^{\hat{t}} = \langle \mathfrak{R}^{\hat{t}}, \mathbf{e}^{\hat{t}} \rangle$ в текущий момент времени \hat{t} называется текущим.

Каждый робот $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) может выполнять действия, описываемые вектором $\mathbf{a}_j(t) = [a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]^T$ (m — число возможных действий j -го робота), причем робот $R_j \in \mathfrak{R}$ может выполнять множество действий $\{\mathbf{a}_j\}$. Множество действий, которые может выполнять группа роботов, есть объединение множеств действий отдельных роботов группы: $\{\mathbf{a}\}_c = \{\mathbf{a}\}_1 \cup \{\mathbf{a}\}_2 \cup \dots \cup \{\mathbf{a}\}_N$.

Действия, выполняемые группой роботов в момент времени t , могут быть описаны с помощью вектор-функции $\mathbf{a}_c(t) = [\mathbf{a}_1(t), \mathbf{a}_2(t), \dots, \mathbf{a}_N(t)]^T$. Изменения состояния системы "группа роботов — среда" описываются системой дифференциальных уравнений вида

$$\dot{s}_c = f_c(s_c(t), \mathbf{a}_c(t)). \quad (2)$$

При этом на ситуации, а также на действия роботов группы могут накладываться некоторые ограничения:

$$s_c(t) \in \{s_c^p(t)\} \subset \{s_c\}, \mathbf{a}_c(t) \in \{\mathbf{a}_c^p(t)\} \subset \{\mathbf{a}_c\}, \quad (3)$$

где $\{s_c^p(t)\}$ — множество допустимых в момент времени t состояний системы "группа роботов — среда"; $\{\mathbf{a}_c^p(t)\}$ — множество допустимых в момент времени t действий группы роботов.

С учетом введенных выше обозначений задача группового управления роботами заключается в определении на интервале $[t_0, t_f]$ таких оптимальных действий $\bar{\mathbf{a}}_j(t)$ для каждого робота $R_j \in \mathfrak{R}$, которые переводят систему "группа роботов — среда" из начального состояния в конечное (целевое) и при которых удовлетворяются система связей (2), ограничения (3), а также обеспечивается экстремум функционала

$$Y_c = \int_{t_0}^{t_f} F(s_c(t), \mathbf{a}_c(t), t) dt = \int_{t_0}^{t_f} F(\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_N(t), \mathbf{e}(t), \mathbf{a}_1(t), \mathbf{a}_2(t), \dots, \mathbf{a}_N(t), t) dt,$$

задающего цель функционирования группы роботов и оценивающего качество процесса управления.

Можно выделить три класса задач группового управления для различных условий: задачи группового управления в стационарных организованных средах, задачи группового управления в динамических, недетерминированных ситуациях и задачи группового управления в условиях противодействия противника, например, другой группы роботов. Наиболее сложными в алгоритмическом плане являются именно задачи группового управления роботами в условиях динамических, недетерминированных ситуаций, и эта сложность возрастает при наличии активного организованного противодействия.

Для задач группового управления роботами, функционирующими в условиях динамических, недетерминированных сред, недостаточно существования оптимального управления. Необходимо еще, чтобы это управление было найдено в течение времени, за которое состояние $s_c(t)$ системы "группа роботов — среда" существенным образом не изменится.

Рассмотрим некоторые современные подходы, используемые для решения задачи группового управления.

Возможные подходы к решению задачи группового управления

Для организации систем управления группами роботов целесообразно использовать некоторые общие стратегии, применяемые для управления во всех технических, социальных и природных группах. Можно выделить стратегии централизованного и децентрализованного управления, как показано на рис. 1, а также смешанные (комбинированные) стратегии.

Примером централизованного подхода является, например, проект "MARTHA" [10], концепция которого заключается в следующем.

Система управления группой роботов состоит из двух основных частей: центральной станции и бортовых вычислителей с контроллером связи. Центральная станция устанавливается стационарно в командном центре и решает задачу планирования действий всей группы роботов. Кроме того, она обеспечивает связь человека-оператора с каждым роботом группы в случае непредвиденных ситуаций, а также используется для постановки целевой задачи. На борту каждого робота устанавливается бортовой вычислитель, который предназначен для решения задачи маршрутизации его движения к указанной цели. Контроллер связи служит для обеспечения связи робота с центральной станцией и с другими роботами группы.

К преимуществам централизованной единоначальной стратегии группового управления следует отнести, в первую очередь, простоту ее организации и, соответственно, алгоритмизации. С другой стороны, данная стратегия имеет и ряд существенных недостатков. Вместе с тем, на центральный узел управления (ЦУУ) (командира) возлагается сложная задача оптимизации действий всех членов группы для достижения групповой цели, причем сложность этой задачи экспоненциально возрастает с увеличением числа объектов в группе. Следствием этого является длительное время принятия решений в по-

добных системах, например в шахматах. Поэтому при использовании такой стратегии решение задачи группового управления стараются получить заранее, до начала действий, а затем спланированные действия реализуются по принципу программного управления без учета непредвиденных изменений в среде (например, как это осуществляется в промышленных автоматизированных производствах).

Частично указанный недостаток устраняется при использовании стратегии иерархического управления.

Кроме того, следует подчеркнуть, что все системы группового управления, использующие централизованную стратегию, имеют существенный недостаток — низкую живучесть.

Этого недостатка лишены системы группового управления, использующие стратегию децентрализованного управления. Суть этой стратегии заключается в том, что в системе нет какого-либо ЦУУ или командира, а каждый член группы самостоятельно принимает решение о своих действиях, пытаясь при этом внести максимально возможный вклад в достижение общей, групповой цели.

Подобный подход был реализован в Технологическом институте штата Джорджия (США) в Лаборатории мобильных роботов колледжа вычислительной техники, а также в Лаборатории робототехники Университета Южной Калифорнии (США), где в рамках программы MARS-2020 проводились исследования, связанные с разработкой методов организации распределенных систем управления поведением групп роботов, функционирующих в естественной заранее неизвестной среде. В частности, были разработаны децентрализованные методы организации мультиагентного взаимодействия в группах роботов при решении задач обследования помещений и территорий, методы формирования стратегий поведения групп роботов, отрабатываются сетевые технологии связи между роботами группы. Исследования основываются на применении технологий мультиагентных систем [11, 12].

Основные исследования ведутся с использованием групп роботов, решающих задачу "фуражирования". В основу положена модель пищевого поведения стайных живых организмов: птиц, пчел, муравьев и др. При этом используется подход, реализующий принципы ситуационного управления [13]. Идея подхода основывается на использовании методов управления, базирующихся на наборах различных типов поведения роботов.

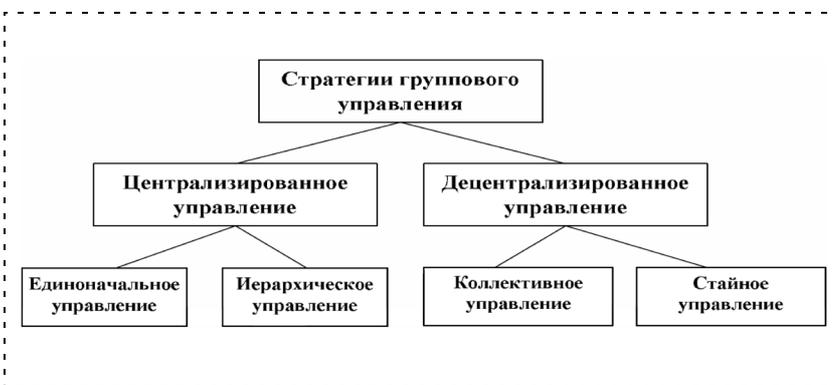


Рис. 1. Стратегии группового управления

Другими словами, для каждого робота определено несколько типов поведения, которые они используют в зависимости от ситуации. Например, группа роботов решает задачу обследования местности. Для координации их действий каждому роботу необходимо поддерживать связь хотя бы с одним из роботов группы. С этой целью для каждого робота группы предусмотрены и заложены в алгоритм его функционирования следующие типы поведения, обеспечивающие поддержание связи:

- зондирование, т. е. поиск ближайшего открытого пространства;
- движение к возвышенному участку местности;
- движение к ближайшему соседу (ближайшему роботу группы);
- поддержание заданной дистанции.

Роботы в процессе функционирования должны постоянно поддерживать связь. При потере связи робот, оказавшийся без связи, должен или подойти к ближайшему соседнему роботу, если таковой виден, для восстановления связи, а затем поддерживать ее, двигаясь на необходимой дистанции, или найти и переместиться к открытому участку местности, или подняться на возвышенное место. При этом, конечно, роботы должны обходить препятствия.

Другим примером подхода к проблеме организации мультиагентного взаимодействия в группах роботов является подход, предложенный в Институте робототехники университета Карнеги—Меллона. Для координации действий в мультиробототехнических системах, решающих задачу обследования и картографирования местности, здесь предложено использовать методы свободной рыночной экономики [14—16].

В основе подхода лежит рыночная архитектура управления поведением группы роботов. Рыночная экономика, как правило, не ориентирована на централизованное управление, участники самостоятельно продают и покупают товары и услуги, заключая контракты и извлекая выгоду. Аналогичный подход был применен к группе роботов, выполняющих распределенные задачи сбора информации в среде с известной инфраструктурой [16]. Роботы в группе взаимодействуют, как бы участвуя в рыночной экономике и обеспечивая высокую общую производительность, максимизируя собственный вклад.

Рыночный подход не ориентирован на совершенную связь между роботами группы и работает, даже если связь пропадает в процессе функционирования, но, естественно, с меньшей эффективностью. Здесь предусматривается и наличие ЦУУ, роль которого заключается в обеспечении интер-

фейса между группой роботов и человеком-оператором. Таких устройств может быть несколько.

Основная цель роботов группы — получить максимальный доход. Доход выплачивается отдельным роботам ЦУУ, представляющим интересы человека-пользователя, за предоставляемую ими информацию о среде.

Окружающая среда представляется сеткой, в которой ячейки могут быть помечены как свободное место, место с препятствием или как неизвестное. Количество информации, полученной при посещении роботом целевой точки, может быть вычислено путем подсчета числа неизвестных ячеек в области с фиксированным радиусом и с центром в целевой точке. Как правило, размеры области определяются дальностью действия сенсорных устройств роботов. Также учитывается число неизвестных ячеек, попавших в поле зрения датчиков робота по пути к целевой точке.

Прибыль рассчитывается как доход минус затраты. Значение дохода умножается на некоторый весовой коэффициент, определяемый значением минимально допустимых затрат на получение единицы информации (в данном случае это ожидаемое расстояние, которое нужно пройти для получения информации об одной неизвестной ячейке), при которых получение этой информации является еще выгодным. Таким образом, информация как бы приводится к расстоянию, которое роботы должны пройти, чтобы собрать информацию. Каждый робот группы пытается максимизировать количество получаемой им новой информации и минимизировать собственные перемещения. Таким образом, действуя в своих личных целях, отдельные роботы группы пытаются максимизировать информацию, получаемую всей группой и минимизировать используемые ресурсы.

Группа роботов, предназначенная для решения задач сбора информации и картографирования местности, представлена на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

К преимуществам децентрализованной стратегии группового управления следует отнести следующее. Во-первых, задача, решаемая каждым членом группы, будет не сложной, поскольку он решает задачу оптимизации только своих действий в составе группы, не пытаясь оптимизировать действия всей группы в целом. Поэтому решение может осуществляться быстро, в реальном масштабе времени изменения ситуации в среде.

Второе преимущество децентрализованной стратегии группового управления — это их высокая живучесть. Действительно, поскольку в них нет ЦУУ

или командира, то все члены группы равны, и поэтому выход из строя или уничтожение любого из них не приводит к выходу из строя всей группы в целом. При этом высокая живучесть группы достигается без каких-либо дополнительных затрат, а только лишь за счет самой децентрализованной организации группового управления.

К недостаткам стратегии децентрализованного группового управления следует отнести сложность ее алгоритмизации, поскольку каждый член группы должен четко понимать групповую задачу и уметь соответственно выбирать такие свои действия, которые приводят к наилучшему ее решению с точки зрения всей группы. Это, в свою очередь, подразумевает высокий "интеллектуальный уровень" всех членов группы, чего, как известно, добиться не просто.

Второй недостаток заключается в том, что в отличие от стратегии централизованного управления децентрализованная стратегия не гарантирует оптимального решения групповой задачи, поскольку решение принимается каждым членом группы самостоятельно.

На основании анализа существующих подходов сделан вывод о том, что наиболее эффективными являются распределенные системы, реализующие стратегию децентрализованного группового управления роботами, так как время принятия решений о групповых действиях роботов в таких системах значительно меньше, чем при других способах организации, и такие системы являются более живучими. В то же время можно сделать вывод об отсутствии в настоящее время эффективных подходов к решению проблемы группового управления, реализующих децентрализованную стратегию в условиях динамически изменяющихся ситуаций.

Метод коллективного управления в группах роботов

В основу предлагаемого подхода положены принципы коллективного взаимодействия, используемые коллективами людей, выполняющих общую работу без руководителя или командира. Предлагается метод коллективного управления, суть которого заключается в том, что каждый робот группы самостоятельно определяет свои очередные действия, направленные на достижение коллективной цели наилучшим в текущей ситуации образом. Решения об очередных действиях принимаются каждым роботом на основе информации о своем текущем состоянии, о состоянии среды вокруг робота и выбранных до него действиях остальных роботов группы.

В общем случае процессы в системе "группа роботов — среда" непрерывны, но в реальности вектор-функции управления (действия) $\mathbf{a}_c(t)$ не являются непрерывными. Это обусловлено такими факторами, как:

- дискретность представления данных в цифровых вычислительных устройствах систем управления роботов;
- разрешающая способность (по времени) сенсорных устройств;
- цикличность вычислений и т. д.

По этим причинам групповые действия роботов $\mathbf{a}_c(t)$ представляют собой разрывную функцию времени, которая изменяется скачкообразно лишь в определенные моменты времени $t = 0, 1, 2, \dots$ — дискретное время.

Показано, что в дискретной постановке задача управления группой роботов сводится к задаче выбора и выполнения в текущий момент времени \hat{t} роботами группы таких групповых действий $\mathbf{a}_c(t)$, которые обеспечивают экстремум (максимум, если оцениваются выгоды от действий роботов группы, или минимум, если оцениваются затраты) целевого функционала

$$Y_c(\hat{t}) = \sum_{t=\hat{t}}^{t_f-1} F(\mathfrak{R}(t), \mathbf{e}(t), \mathbf{a}_c(t), \mathbf{g}(t))\Delta t, \quad (4)$$

где $\mathbf{g}(t)$ — вектор противодействующих сил. Далее, для простоты рассмотрения материала, речь будет идти о максимуме целевого функционала.

В этом случае задача каждого робота группы $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$ заключается в том, чтобы выполнять такие действия $\mathbf{a}_c(t) (t = 0, 1, 2, \dots, t_f - 1)$, которые бы приводили к достижению цели, стоящей перед роботом R_j , и при этом максимизировали функционал

$$Y_j(\hat{t}) = \sum_{t=\hat{t}}^{t_f-1} F_j(\mathbf{r}_j(t), \mathbf{e}_j(t), \mathbf{a}_j(t), \mathbf{g}_j(t))\Delta t \rightarrow Y_j^{\max} \quad (5)$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_j^0 &= \mathbf{r}_j(t_0) = \mathbf{r}_j(\hat{t}), \mathbf{e}_j^0 = \mathbf{e}_j(t_0) = \mathbf{e}_j(\hat{t}); \\ \mathbf{a}_j^0 &= \mathbf{a}_j(t_0) = \mathbf{a}_j(\hat{t}), \mathbf{g}_j^0 = \mathbf{g}_j(t_0) = \mathbf{g}_j(\hat{t}), \end{aligned} \quad (6)$$

уравнениях связи

$$\begin{aligned} s_j(\hat{t} + 1) &= f_j(s_j(\hat{t}), \mathbf{a}_1(\hat{t}), \mathbf{a}_2(\hat{t}), \dots, \mathbf{a}_j(\hat{t}), \dots, \\ &\dots, \mathbf{a}_N(\hat{t}), \mathbf{g}_j(\hat{t})), j = \overline{1, N}, \hat{t} = \overline{0, t_f - 1} \end{aligned} \quad (7)$$

и ограничениях

$$\mathbf{a}_j(t) \in \{\mathbf{a}_j^p(t)\}, \mathbf{r}_j(t) \in \{\mathbf{r}_j^p(t)\}, \mathbf{e}_j(t) \in \{\mathbf{e}_j^p(t)\}. \quad (8)$$

Предложен подход к решению дискретной задачи коллективного управления группой роботов, основанный на использовании итерационной процедуры, в рамках которой роботы последовательно выбирают свои очередные действия. Для того чтобы реализовать итерационную процедуру решения оптимизационной задачи (5)—(8), роботы в группе должны быть определенным образом пронумерованы. Существо итерационного метода решения оптимизационной задачи (5)—(8) заключается в следующем. Каждый робот R_j группы выбирает свое очередное действие на основе информации о групповой цели, своем текущем состоянии, текущем состоянии среды, текущем значении помехи (если таковая имеет место) и выбранных до него действиях остальных роботов группы, т. е. в соответствии с итерационной формулой

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_j^{k+1} = \\ = \mathbf{f}_j(\mathbf{a}_1^{k+1}, \dots, \mathbf{a}_{j-1}^{k+1}, \mathbf{a}_j^k, \mathbf{a}_{j+1}^k, \dots, \mathbf{a}_N^k, \mathbf{r}_j^0, \mathbf{e}_j^0, \mathbf{g}_j^0), \\ j = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ — номер итерации.

При этом, естественно, должны учитываться ограничения (8).

Следует отметить, что к допустимым в текущий момент времени действиям $\{\mathbf{a}_j^p\}^0$ робота $R_j \in \mathcal{R}$ относятся лишь те действия из множества допустимых $\{\mathbf{a}_j^p\}$, при которых выполняется условие $\Delta Y_c^j \geq 0$. Это неравенство можно рассматривать как условие того, что действия отдельных роботов не наносят ущерб коллективу в целом.

Действие \mathbf{a}_j^{k+1} робота R_j учитывается всеми остальными роботами группы при выборе своих новых текущих действий. Поэтому при выборе роботом R_j своего нового текущего действия \mathbf{a}_j^{k+1} путем решения дискретной задачи (5)—(8) все остальные роботы группы должны попытаться осуществить новый выбор своих оптимальных с точки зрения достижения групповой цели действий, поскольку старый выбор не учитывал нового действия робота R_j . Итерационные циклы оптимизации повторяются до тех пор, пока приращение целевого функционала (4) не прекращается или не становится пренебрежимо малым.

Доказано, что предложенная итерационная процедура оптимизации коллективных действий является конечной, сходящейся и устойчивой. Она позволяет за число итерационных циклов, не превышающее число роботов в группе, найти для каждого робота группы такое действие, которое является оптимальным или близким к нему в смысле достижения общей групповой цели. Эта процедура лежит в основе последующих предлагаемых методов и алгоритмов.

Задача группового управления роботами значительно усложняется в условиях организованного противодействия, например, со стороны другой группы роботов, что наглядно демонстрирует игра роботов в футбол. Предложенный метод коллективного управления и реализующая его итерационная процедура оптимизации коллективных действий могут быть использованы и для решения задач такого класса. В частности, были проведены исследования, показывающие, что управление действиями роботов-игроков может быть реализовано за счет многократного решения задачи распределения целей в группе роботов.

Наиболее живучими группами являются группы, использующие стратегию стайного управления. Данная стратегия управления подразумевает, что каждый объект, входящий в группу, может и не иметь никакой информационной связи с другими объектами и более того, даже может не знать ни число объектов, входящих в его группу, ни их характеристики.

Тем не менее, на основании косвенной информации об изменениях состояния среды, вызванных действиями других объектов, входящих в группу, каждый объект должен уметь "подстраивать" свои действия под действия всех остальных объектов группы с тем, чтобы совместными усилиями достичь общей групповой цели.

Как показали исследования с использованием имитационной программной модели (рис. 3, см. третью сторону обложки), при стайном управлении обеспечивается малое время принятия решений каждым роботом стаи, так как принимаются решения только о своих действиях. При этом каждый робот выбирает, возможно, не самое лучшее с точки зрения оптимального достижения общей цели действие, но оптимальное в рамках имеющейся у него на данный момент информации о сложившейся ситуации. В целом проведенные исследования подтверждают эффективность предложенных принципов и работоспособность алгоритма стайного управления.

На рис. 4 приведены оценки времени принятия решения о групповых действиях роботов в систе-

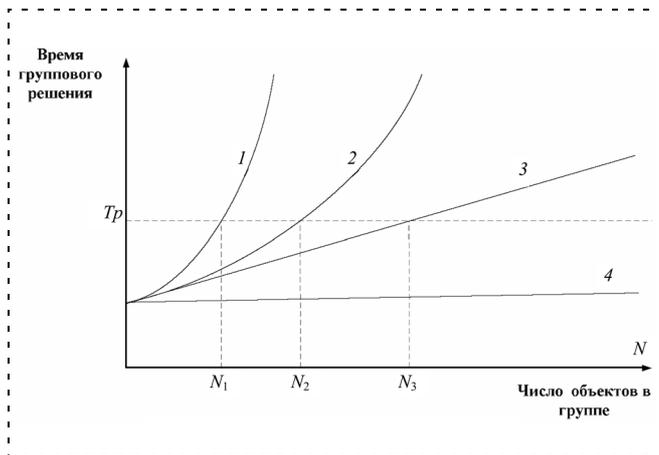


Рис. 4. Время группового решения при различных стратегиях управления:

1 — стратегия единоначального управления; 2 — стратегия иерархического управления; 3 — стратегия коллективного управления; 4 — стратегия стайного управления

мах, использующих различные принципы организации, в зависимости от числа роботов в группе.

При централизованной стратегии управления ЦУУ или командир принимают решение о действиях всех подчиненных ему объектов группы. При этом сложность задачи возрастает экспоненциально от числа объектов в группе и, соответственно, экспоненциально возрастает время ее решения. При использовании же стратегии децентрализованного группового управления каждый объект группы принимает решения только за себя, обмениваясь информацией с другими членами группы в целях оптимизации группового решения. Поэтому время группового решения в такой группе возрастает практически линейно при увеличении числа ее членов. При стайном управлении время группового решения остается практически постоянным или увеличивается незначительно при росте числа роботов в стае.

Заключение

Таким образом, предложенный в данной статье подход позволяет достаточно быстро и эффективно решать основные, наиболее сложные, задачи группового управления роботами. Они могут применяться при управлении как большими, так и срав-

нительно малыми группами роботов различного назначения, которые могут действовать как в детерминированной, организованной среде, так и в недетерминированной, динамически изменяющейся среде, в том числе и при наличии организованного или естественного (неорганизованного) противодействия.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Принципы группового управления роботами // Матер. науч. молодеж. школы. "Экстремальная робототехника-2003". Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. С. 165—171.
2. Юревич Е. И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 2. С. 9—13.
3. Юревич Е. И. Управление роботами и робототехническими системами: Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 168 с.
4. Каляев И. А., Капустян С. Г., Усачев Л. Ж. Многопроцессорная система управления движением транспортного робота // Сб. тр. науч.-техн. конф. "Технические средства и система контроля и управления объектами повышенной ответственности". Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1987. С. 72—78.
5. Каляев И. А., Капустян С. Г., Мишкинюк В. К., Рубцов И. В. Многопроцессорная система управления интеллектуального мобильного робота // Матер. конф. "Робототехника для экстремальных условий". СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996. С. 124—132.
6. Kaliaev I., Kapustian S. Multiprocessor distributed control system of intelligent mobile robot // 14-th Workshop on Distributed Control Systems. Seoul, Korea, July 1997.
7. Каляев И. А., Капустян С. Г., Клименко В. В., Усачев Л. Ж., Стоянов С. В. Многопроцессорные распределенные системы управления интеллектуальных роботов // Современные технологии автоматизации. 1997. № 4. С. 94—97.
8. Каляев И. А. Принципы организации систем управления интеллектуальных мобильных роботов на базе многопроцессорных и нейропроцессорных структур // Мобильные роботы и мехатронные системы: сб. докладов науч. школы-конференции (с международным участием). М.: Изд-во ИПМ РАН, 1998. С. 86—106.
9. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. М.: Янус-К, 2002. 292 с.
10. Alami R., Fleury S., Herrb M., Ingrid F., Robert F. Multi-Robot Cooperation in the MARTHA Project // IEEE Robotics & Automation magazine. 1998. Vol. 5, N 1. P. 36—47.
11. Balch T., Arkin R. C. Motor schema-based Formation Control for Multiagent Robot Team // Proc. of First Inter. Conf. on Multiagent Systems, June 1995, San Francisco. P. 10—16.
12. Ali K. S., Arkin R. C. Multiagent Teleautonomous Behavioral Control // Machine Intelligence and Robotic Control. 2000. Vol. 1. N 2. P. 3—10.
13. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986.
14. Dias M. B., Stentz A. A Free Market Architecture for Distributed Control of a Multirobot System // Proc. of the 6th Intern. Con. on Intelligent Autonomous Systems (IAS), Venice, Italy, July, 2000.
15. Stentz A., Dias M. B. A Free Market Architecture for Coordinating Multiple Robots tech. report CMU-RI-TR-99-42, Robotics Institute, Carnegie Mellon University. December, 1999.
16. Zlot R., Stentz A., Dias M. B., Thayer S. Multi-Robot Exploration Controlled By A Market Economy // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2002.

С. А. Краснова, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
В. А. Уткин, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
А. В. Уткин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
 Институт проблем управления
 им. В. А. Трапезникова РАН,
 vicutkin@ipu.rssi.ru

Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности

Разработаны блочные процедуры синтеза обратной связи в задаче слежения применительно к механическим системам, функционирующим в условиях неопределенности модели объекта управления и действия внешних возмущений. Показано, что в конфигурационном пространстве задача слежения за заданными траекториями обобщенных координат манипулятора решается экспоненциально, если неопределенности принадлежат классу гладких функций, и с заданной точностью, если неопределенности описываются ограниченными негладкими функциями. Информационная поддержка законов управления осуществляется с помощью наблюдателей состояния при минимально необходимом комплекте измерительных устройств. Приводятся сравнительные характеристики разработанных процедур синтеза и результаты моделирования.

Ключевые слова: механические системы, блочный метод управления, скользящий режим, наблюдатель состояния, внешние возмущения.

В статье рассматривается комплекс задач управления электромеханическими системами, в качестве объекта управления рассматриваются роботы-манипуляторы с учетом динамики исполнительных устройств (ИУ). Объект управления имеет такие качественные признаки сложной системы, как нелинейность, многосвязность, нестационарность, неопределенность динамической модели, наличие внешних возмущений и др.

Одним из перспективных направлений в проектировании систем управления электромеханическими объектами является использование методов теории систем с разрывными управлениями, в которых на многообразии переключения возникает скользящий режим [1]. При работе в скользящем режиме система остается нечувствительной к параметрическим неопределенностям и внешним возмущениям, что позволяет обеспечить робастные и инвариантные свойства замкнутой системы. Алгоритмы синтеза разрывных управлений просты в реализации по сравнению с непрерывными управлениями [2, 3], поскольку условия существования скользящих режимов основаны на неравенствах, что снижает требования к параметрической и сигнальной определенности динамической модели, и, как следствие, позволяют сократить объем и время необхо-

димых для их реализации вычислений. Дополнительным стимулом к использованию методов синтеза систем со скользящими режимами является декомпозиция общего движения замкнутой системы на движения, различающиеся по темпам, соответствующие этапу попадания на многообразие скольжения и этапу движения вдоль этого многообразия, что существенно облегчает проблему синтеза обратных связей в многомерных системах.

Наиболее ярко преимущества использования разрывных управлений в электромеханических системах проявляются в случае, когда в виде разрывных функций формируют управляющие моменты [1, 4]. Однако данные результаты носят скорее теоретический характер, так как непосредственно не реализуемы из-за физических ограничений, налагаемых на силы и моменты, развиваемые ИУ. Вместе с тем, синтез разрывной обратной связи с учетом динамики ИУ [4, 5] приводит к потере инвариантных свойств замкнутой системы, поскольку неопределенности механической системы не принадлежат пространству истинных разрывных управлений. Следует также отметить, что существенный пробел в подавляющем большинстве исследований по управлению электромеханическими объектами связан с тем, что фазовые переменные полагаются доступными для измерений, т. е. задача наблюдения не ставится и не решается. Наличие полного комплекта датчиков приводит к удорожанию и снижению эксплуатационных характеристик системы, а также к усложнению процедуры синтеза управления, в которой приходится учитывать динамику измерительных устройств.

В данной статье рассмотрен комплекс процедур декомпозиционного синтеза обратной связи для решения задач слежения за заданными траекториями обобщенных координат манипулятора с учетом динамики ИУ, обеспечивающих инвариантность к неопределенностям оператора объекта управления и внешним возмущениям широкого класса при неполных измерениях фазовых переменных. В качестве методологической основы декомпозиции задач синтеза используется блочный подход [5–8]. Его суть состоит в представлении модели исходной системы в блочной форме, на основе которой задача синтеза разделяется на независимо решаемые элементарные подзадачи в отдельных блоках, где в качестве фиктивных управлений фигурируют фазовые переменные. Приведение математических моделей электромеханических систем к блочным формам управляемости относительно выходных переменных является основой для декомпозиционного синтеза как задачи управления, так и задачи наблюдения относительно одного и того же координатного бази-

са, что существенно упрощает структуру регулятора. Для информационной поддержки базовых законов управления разработаны методы построения наблюдателей состояния различного типа [9], что позволяет сократить число датчиков и объем априорной информации об объекте управления и среде его функционирования.

В статье решаются задачи синтеза обратной связи, обеспечивающие в зависимости от класса имеющихся неопределенностей либо экспоненциальную сходимость, либо заданную точность слежения в пространстве обобщенных координат робота. Приводятся результаты моделирования и сравнительный анализ предлагаемых процедур.

1. Обеспечение экспоненциальной сходимости к заданным траекториям

1.1. Описание модели объекта управления. Постановка задачи

Рассматривается математическая модель электромеханического объекта

$$\dot{\mathbf{q}}_1 = \mathbf{q}_2, \dot{\mathbf{q}}_2 = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{q}_1)[\mathbf{v} - \mathbf{C}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)\mathbf{q}_2 - \mathbf{G}(\mathbf{q}_1) + \boldsymbol{\eta}(t)]; \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{A}\mathbf{v} - \mathbf{D}\mathbf{q}_2 + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (2)$$

где (1) — модель механической подсистемы — манипулятора с n степенями свободы, в котором звенья соединены последовательно и не имеют точек ветвления, образуют кинематические пары 5-го класса и являются абсолютно жесткими телами; $\mathbf{q}_1 \in Q_1 \subset R^n$ — вектор обобщенных координат; $\mathbf{q}_2 \in Q_2 \subset R^n$ — вектор обобщенных скоростей; $\mathbf{H}_{n \times n}(\mathbf{q}_1) > 0$ — нелинейная симметрическая матрица инерции, $\mathbf{H}^{-1} > 0$; $\mathbf{C}_{n \times n}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)$ — матрица центробежных и кориолисовых сил; $\mathbf{G}_{n \times 1}(\mathbf{q}_1)$ — вектор гравитационных сил; вектор $\boldsymbol{\eta}(t) \in R^n$ — часть обобщенных сил, трактуемых как внешние неконтролируемые возмущения; $\mathbf{v} \in R^n$ — вектор моментов, развиваемых ИУ, компоненты которого в механической подсистеме (1) играют роль фиктивных управлений, реализуемых в классе непрерывных ограниченных функций с ограниченными производными. Подсистема (2) описывает учитываемую динамику ИУ, в качестве которых рассматриваются двигатели постоянного тока с жестким типом сочленений; \mathbf{A} , \mathbf{D} , \mathbf{B} — диагональные матрицы с положительными постоянными известными коэффициентами; $\mathbf{u} \in R^n$ — вектор напряжений якорей электродвигателей (разрывные управляющие воздействия, $|u_i| \leq U_i = \text{const}$, $i = \overline{1, n}$).

Ставится задача синтеза обратной связи, обеспечивающей экспоненциальную сходимость к за-

данным траекториям обобщенных координат $\mathbf{q}_{1d}(t) \in Q_1 \subset R^n$ с заданными темпами сходимости

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{q}_1(t) = \mathbf{q}_{1d}(t) \quad (3)$$

в следующих предположениях: 1) компоненты матриц \mathbf{H} , \mathbf{C} , \mathbf{G} , внешние возмущения $\boldsymbol{\eta}$, производные задающих воздействий $\dot{\mathbf{q}}_{1d}(t) = \mathbf{q}_{2d}(t)$ являются гладкими ограниченными, в общем случае, неизвестными функциями, полные производные которых ($\dot{\mathbf{H}}$, $\dot{\mathbf{C}}$, $\dot{\mathbf{G}}$, $\dot{\boldsymbol{\eta}}$, $\dot{\mathbf{q}}_{2d} = \mathbf{q}_{3d}$, $\dot{\mathbf{q}}_{3d}$) также ограничены; 2) для измерения доступны только положения звеньев манипулятора $\mathbf{q}_1(t)$.

Задача (3) решается в рамках блочного подхода [5–8], суть которого заключается в пошаговых неособых преобразованиях модели (1)–(2) к блочной форме управляемости (БФУ) относительно невязок по выходным переменным $\mathbf{e}_1 = \mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_{1d}$, $\mathbf{e}_1 \in R^n$, в каждом блоке которой переменные следующего блока тракуются как фиктивные управления вплоть до выбора истинного разрывного управления. Данный подход позволяет разделить проблему синтеза размерности $3n$ на последовательно решаемые элементарные подзадачи размерности n , в которых размерность регулируемых и регулирующих переменных совпадают.

1.2. Базовые законы управления

Для системы (1)–(2) с помощью последовательности неособых замен переменных $\mathbf{e}_1 = \mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_{1d}$, $\mathbf{e}_2 = \mathbf{q}_2 + \mathbf{K}_1\mathbf{e}_1 - \mathbf{q}_{2d}$, $\mathbf{e}_3 = \mathbf{v} - \mathbf{v}^*$ ($\mathbf{e}_i \in R^n$) получено два типа БФУ, которые отличаются выбором задания \mathbf{v}^* на управляющие моменты ИУ и различной степенью сложности вычислительной реализации.

БФУ 1, на основе которой решается задача слежения относительно обобщенных координат без компенсации перекрестных связей, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_1 &= -\mathbf{K}_1\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2; \dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{H}^{-1}(-\mathbf{K}_2\mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_3); \\ \dot{\mathbf{e}}_3 &= -\mathbf{A}\mathbf{e}_3 + \mathbf{W}_3 + \mathbf{B}\mathbf{u}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{v}^* = -\mathbf{K}_2\mathbf{e}_2 + \mathbf{C}\mathbf{q}_2 + \mathbf{G} - \boldsymbol{\eta} + \mathbf{H}(\mathbf{K}_1^2\mathbf{e}_1 - \mathbf{K}_1\mathbf{e}_2 + \mathbf{q}_{3d})$;

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_3 &= (\mathbf{A}(\mathbf{C} - \mathbf{H}\mathbf{K}_1) + \mathbf{D} + \dot{\mathbf{C}} - \mathbf{C}\mathbf{K}_1 - \dot{\mathbf{H}}\mathbf{K}_1 + \\ &+ \mathbf{H}\mathbf{K}_1^2)\mathbf{K}_1\mathbf{e}_1 + (\mathbf{A}(\mathbf{K}_2 - \mathbf{C} + \mathbf{H}\mathbf{K}_1) - \mathbf{D} - \dot{\mathbf{C}} + \\ &+ (\mathbf{C} + \dot{\mathbf{H}} - \mathbf{H})\mathbf{K}_1 + (\mathbf{C} - \mathbf{K}_2 - \mathbf{H}\mathbf{K}_1)\mathbf{H}^{-1}\mathbf{K}_2)\mathbf{e}_2 + \\ &+ (\mathbf{K}_2 - \mathbf{C} + \mathbf{H}\mathbf{K}_1)\mathbf{H}^{-1}\mathbf{e}_3 - (\mathbf{A}\mathbf{C} + \mathbf{D} + \dot{\mathbf{C}})\mathbf{q}_{2d} - \\ &- (\mathbf{A}\mathbf{H} + \mathbf{C} + \dot{\mathbf{H}})\mathbf{q}_{3d} - \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}}_{3d} + (\mathbf{A} + \mathbf{C}\mathbf{H}^{-1})\boldsymbol{\eta} + \\ &+ \dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{A}\mathbf{G} - \dot{\mathbf{G}}. \end{aligned}$$

БФУ 2, в которой реализуется метод динамической декомпозиции и автономное управление обобщенными координатами, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -\mathbf{K}_1 e_1 + e_2; \quad \dot{e}_2 = -(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) e_2 + e_3; \\ \dot{e}_3 &= \mathbf{W}_3 + \mathbf{H}^{-1} \mathbf{B} u, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{v}^* = \mathbf{H}(-\mathbf{K}_2 e_2 + e_3 + \mathbf{K}_1^2 e_1 + q_{3d}) + \mathbf{C} q_2 + \mathbf{G} - \eta$;
 $\mathbf{W}_3 = \mathbf{H}^{-1}(-\mathbf{A} \mathbf{H} e_3 + \mathbf{W}_1) + \mathbf{W}_2$;

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_1 &= (\mathbf{A} \mathbf{C} - \mathbf{A} \mathbf{H} \mathbf{K}_1 + \mathbf{D} + \dot{\mathbf{C}} - \mathbf{C} \mathbf{K}_1 - \dot{\mathbf{H}} \mathbf{K}_1) \mathbf{K}_1 e_1 + \\ &+ \mathbf{A} \mathbf{H} \mathbf{K}_2 e_2 - (\mathbf{C} + \mathbf{A} \mathbf{H}) e_3 + (\mathbf{A} \mathbf{C} + \mathbf{D} - \dot{\mathbf{C}}) q_{2d} - \\ &- (\mathbf{A} \mathbf{H} + \mathbf{C} - \dot{\mathbf{H}}) q_{3d} + \mathbf{A} \eta + \dot{\eta} - \mathbf{A} \mathbf{G} - \mathbf{G}; \\ \mathbf{W}_2 &= \mathbf{K}_1^3 e_1 + (-\dot{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1^2 - \mathbf{K}_2^2 + \mathbf{K}_2 \mathbf{K}_1 - \\ &- \mathbf{A} \mathbf{C} - \mathbf{D} - \dot{\mathbf{C}} + \mathbf{C} \mathbf{K}_2) e_2 + (\mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{H}) e_3 - \dot{q}_{3d}. \end{aligned}$$

В блочных формах (4), (5) $\mathbf{K}_j = \text{diag}(k_{ji}) > 0$ — коэффициенты обратной связи ($j = 1, 2$), обеспечивающие заданные характеристики переходного процесса (3), компоненты вектор-функции $\mathbf{W}_3 = \text{col}(W_{3i})$ трактуются как неизвестные ограниченные возмущения $|W_{3i}| \leq \overline{W}_{3i} = \text{const}$, $i = \overline{1, n}$. Переменные третьих блоков блочных форм (4), (5) $e_3 = \mathbf{v} - \mathbf{v}^*$ являются невязками между реальными и синтезируемыми управляющими моментами, последние одновременно являются задающими воздействиями для системы управления ИУ. Таким образом, осуществляется декомпозиция верхнего уровня, т. е. в ИУ независимо решается задача слежения за заданными значениями управляющих моментов \mathbf{v}^* (т. е. задача стабилизации невязок $e_3 \rightarrow 0$) посредством выбора истинных управлений \mathbf{u} .

В терминах полученных БФУ разработаны два типа базовых законов управления. Разрывное управление без компенсирующей составляющей

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_3 \text{sign} e_3 \quad (6)$$

(здесь и далее $\text{sign} e_3 = \text{col}(\text{sign} e_{31}, \dots, \text{sign} e_{3n})$, $\mathbf{K}_3 = \text{diag}(k_{3i}) > 0$, $i = \overline{1, n}$) приводит третий блок БФУ 1 (4) к виду $\dot{e}_3 = -\mathbf{A} e_3 + \mathbf{W}_3 - \mathbf{B} \mathbf{K}_3 \text{sign} e_3$, где при выполнении достаточных условий [1] $e_{3i} \dot{e}_{3i} < 0 \Rightarrow \overline{W}_{3i} / b_i < k_{3i}$ ($i = \overline{1, n}$) за конечное время t^* возникнет скользящий режим на многообразии $e_3 = 0$. Третий блок БФУ 2 (5) с учетом (6) примет вид $\dot{e}_3 = \mathbf{W}_3 - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{K}_3 \text{sign} e_3$. Скользящий режим на многообразии $e_3 = 0$ возникнет при выполнении

условия [1] $\lambda_{\min}(\mathbf{q}_1) > \lambda_0 > 0$, где $\lambda_0 > \overline{W}_3 \sqrt{n}$, $\lambda_{\min}(\mathbf{q}_1)$ — минимальное собственное значение матрицы $\frac{1}{2}(\mathbf{P} + \mathbf{P}^T) > 0$, $\mathbf{P} = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{K}_3$. При $t > t^*$ процесс сходимости переменных замкнутых систем (4) и (6), (5) и (6) описывается логической цепочкой

$$e_3 = 0 \Rightarrow e_2 \rightarrow 0 \Rightarrow e_1 \rightarrow 0, \quad (7)$$

что и решает поставленную задачу слежения (3), которая может быть реализована при выполнении неравенств $\forall k_{3i} \leq U_i$, $i = \overline{1, n}$, в которых учтены имеющиеся ограничения на ресурсы управления.

Подавление внешних возмущений может потребовать большой амплитуды разрывных управлений (6), что на практике может привести к возникновению автоколебаний в установившемся режиме. Одним из способов улучшения качества установившихся режимов является формирование комбинированного управления. В БФУ 1 (4) комбинированное управление вида

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{K}_3 \text{sign} e_3 + \mathbf{W}_3) \quad (8)$$

приводит к замкнутому блоку $\dot{e}_3 = -\mathbf{A} e_3 - \mathbf{K}_3 \text{sign} e_3$, где при $0 < k_{3i} \leq b_i U_i - \overline{W}_{3i}$, $i = \overline{1, n}$, возникнет скользящий режим по многообразию $e_3 = 0$ и обеспечатся соотношения (7). Аналогично, в БФУ 2 (5) комбинированное управление

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{K}_3 \text{sign} e_3 + \mathbf{W}_3) \quad (9)$$

приводит к замкнутому блоку $\dot{e}_3 = -\mathbf{K}_3 \text{sign} e_3$, где $0 < k_{3i} \leq \overline{H}_i^{-1} b_i U_i - \overline{W}_{3i}$, $i = \overline{1, n}$, где \overline{H}_i^{-1} — i -я строка матрицы \mathbf{H}^{-1} , \overline{H}_i^{-1} — ее верхняя граница.

Как видим, в алгоритмах (8), (9) амплитуды разрывных управлений сколь угодно малы, что исключает автоколебания в установившемся режиме, но для реализации управления (9) требуется специальная аппаратная поддержка.

1.3. Информационное обеспечение базовых законов управления

Для информационного обеспечения базовых законов управления (6), (8), (9) в данном параграфе рассмотрены принципы построения блочных наблюдателей состояния различных типов. Полученные БФУ (4), (5) одновременно являются и блочно-наблюдаемыми относительно измеряемых переменных $e_1(t) = \mathbf{q}_1(t) - \mathbf{q}_{1d}(t)$ [9]. Этот факт позволяет ре-

шить задачу оценивания непосредственно преобразованных переменных \mathbf{e}_3 , используемых для синтеза обратной связи, что существенно упрощает структуру регулятора.

Вначале рассмотрим принципы построения наблюдателей различных порядков с разрывными корректирующими воздействиями, функционирующими в скользящем режиме. Наблюдатель на основе БФУ 1 (4) имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}_1 &= -\mathbf{K}_1 \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_1, \dot{\mathbf{z}}_2 = \\ &= \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{q}_1)(\mathbf{z}_3 - \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_2); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_3 = -\mathbf{A} \mathbf{z}_3 + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{v}_3; \quad (11)$$

на основе БФУ 2 (5) —

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = -\mathbf{K}_1 \mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_1, \dot{\mathbf{z}}_2 = -(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_3 + \mathbf{v}_2; \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_3 = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{v}_3, \quad (13)$$

где $\mathbf{z}_j \in R^n$ — переменные состояния; $\mathbf{v}_j \in R^n$ — корректирующие воздействия наблюдателей, которые последовательно выбираются в каждом блоке в классе разрывных функций так, чтобы решить задачу стабилизации относительно невязок $\boldsymbol{\varepsilon}_j = \mathbf{e}_j - \mathbf{z}_j$, $\boldsymbol{\varepsilon}_j \in R^n$, $j = \overline{1, 3}$.

С учетом (4), (10), (11) система в невязках для БФУ 1 имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 &= -\mathbf{K}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 - \mathbf{v}_1; \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{q}_1)(\boldsymbol{\varepsilon}_3 - \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\varepsilon}_2 - \mathbf{v}_2); \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 &= -\mathbf{A} \boldsymbol{\varepsilon}_3 + \mathbf{W}_3 - \mathbf{v}_3; \end{aligned}$$

соответственно для БФУ 2 с учетом (5), (12), (13) имеем

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 &= -\mathbf{K}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 - \mathbf{v}_1; \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = -(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1) \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_3 - \mathbf{v}_2; \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 &= \mathbf{W}_3 - \mathbf{v}_3. \end{aligned}$$

Процедура синтеза разрывных корректирующих воздействий наблюдателей состояния (10)—(11) и (12)—(13) заключается в последовательном решении элементарных задач стабилизации невязок [9].

Шаг 1. В первых блоках наблюдателей (10), (12) разрывное корректирующее воздействие $\mathbf{v}_1 = \mathbf{M}_1 \text{sign} \boldsymbol{\varepsilon}_1$ (здесь и далее $\text{sign} \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \text{col}(\text{sign} \boldsymbol{\varepsilon}_{11}, \dots, \text{sign} \boldsymbol{\varepsilon}_{1n})$, $\mathbf{M}_1 = \text{diag}(m_{1i}) > 0$) при выполнении достаточных условий [1] $\boldsymbol{\varepsilon}_{1i} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{1i} < 0 \Rightarrow m_{1i} > |\boldsymbol{\varepsilon}_{2i}|$, $i = \overline{1, n}$, приведет к возникновению за конечное время t_1 скользящего режима на многообразии $S_1 = \{\boldsymbol{\varepsilon}_1 = 0\} \Rightarrow \mathbf{z}_1 = \mathbf{e}_1$. На основе процедуры метода эквивалентного управле-

ния [1] из уравнений статики получим эквивалентное управление $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = 0 \Rightarrow \mathbf{v}_{1\text{eq}} = \boldsymbol{\varepsilon}_2$, которое используется для синтеза корректирующих воздействий во вторых блоках наблюдателей (10), (12).

Шаг 2. Сформируем во вторых блоках наблюдателей (10), (12) разрывное корректирующее воздействие $\mathbf{v}_2 = \mathbf{M}_2 \text{sign} \mathbf{v}_{1\text{eq}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{2i} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{2i} < 0 \Rightarrow m_{2i} > |\boldsymbol{\varepsilon}_{3i}|$, $i = \overline{1, n}$.

Тогда при $t > t_2 > t_1$ имеем: $S_2 = \{S_1 \cap \boldsymbol{\varepsilon}_2 = 0\} \Rightarrow \mathbf{z}_2 = \mathbf{e}_2$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = 0 \Rightarrow \mathbf{v}_{2\text{eq}} = \boldsymbol{\varepsilon}_3$.

Шаг 3. Сформируем в третьих блоках наблюдателей (11), (13) разрывное корректирующее воздействие $\mathbf{v}_3 = \mathbf{M}_3 \text{sign} \mathbf{v}_{2\text{eq}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{3i} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{3i} < 0 \Rightarrow m_{3i} > \overline{W}_{3i}$, $i = \overline{1, n}$. Тогда при $t > t_3 > t_2$ имеем: $S_3 = \{S_2 \cap \boldsymbol{\varepsilon}_3 = 0\} \Rightarrow \mathbf{z}_3 = \mathbf{e}_3$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 = 0 \Rightarrow \mathbf{v}_{3\text{eq}} = \mathbf{W}_3$.

Текущие значения эквивалентных управлений $\mathbf{v}_{j\text{eq}}$, которые соответствуют средним значениям разрывных управлений [1], получим с выходов линейных фильтров первого порядка с малыми постоянными времени вида

$$\mu_j \dot{\boldsymbol{\tau}}_j = -\boldsymbol{\tau}_j + \mathbf{v}_j, \quad j = \overline{1, 3}, \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\tau}_j \in R^n$ — векторы состояния; $\mu_j > 0$ — малые постоянные времени фильтров. При $t > t_j$ справедливы следующие соотношения: $\lim_{\mu_j \rightarrow 0} \boldsymbol{\tau}_j(t) = \mathbf{v}_{j\text{eq}}(t)$, $j = \overline{1, 3}$; $\boldsymbol{\varepsilon}_{j+1} = \boldsymbol{\tau}_j + \mathbf{O}_j(\mu_j, t)$, $j = 1, 2$; $\mathbf{W}_3 = \boldsymbol{\tau}_3 + \mathbf{O}_3(\mu_3, t)$, $\lim_{\mu_j \rightarrow 0} \mathbf{O}_j(\mu_j, t) = 0$.

Текущие оценки, полученные с выходов фильтров (14), позволяют реализовать законы управления (6) или (8), а соотношения (7) начнут выполняться с момента времени $t^* > t_3$. Темпы сходимости переменных состояния наблюдателей к соответствующим переменным БФУ определяются с учетом $t^* > t_3$ выбором коэффициентов коррекции m_{ji} и быстродействием вычислительной среды.

На рис. 1 приведена структурная схема замкнутой системы (4) с наблюдателем состояния (10)—(11), (14) и базовым законом управления (8), который с учетом получаемых оценок реализуется в виде $\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{K}_3 \text{sign} \mathbf{z}_3 + \boldsymbol{\tau}_3)$.

Тот факт, что полные наблюдатели (10)—(11), (12)—(13) позволяют получить текущие оценки неопределенностей \mathbf{W}_3 для формирования комбинированного управления (8), (9), приводит к существенному сокращению объема вычислений, выполняемого в реальном времени, а также объема априорной информации об объекте управления и среде его функционирования. Коэффициенты коррекции

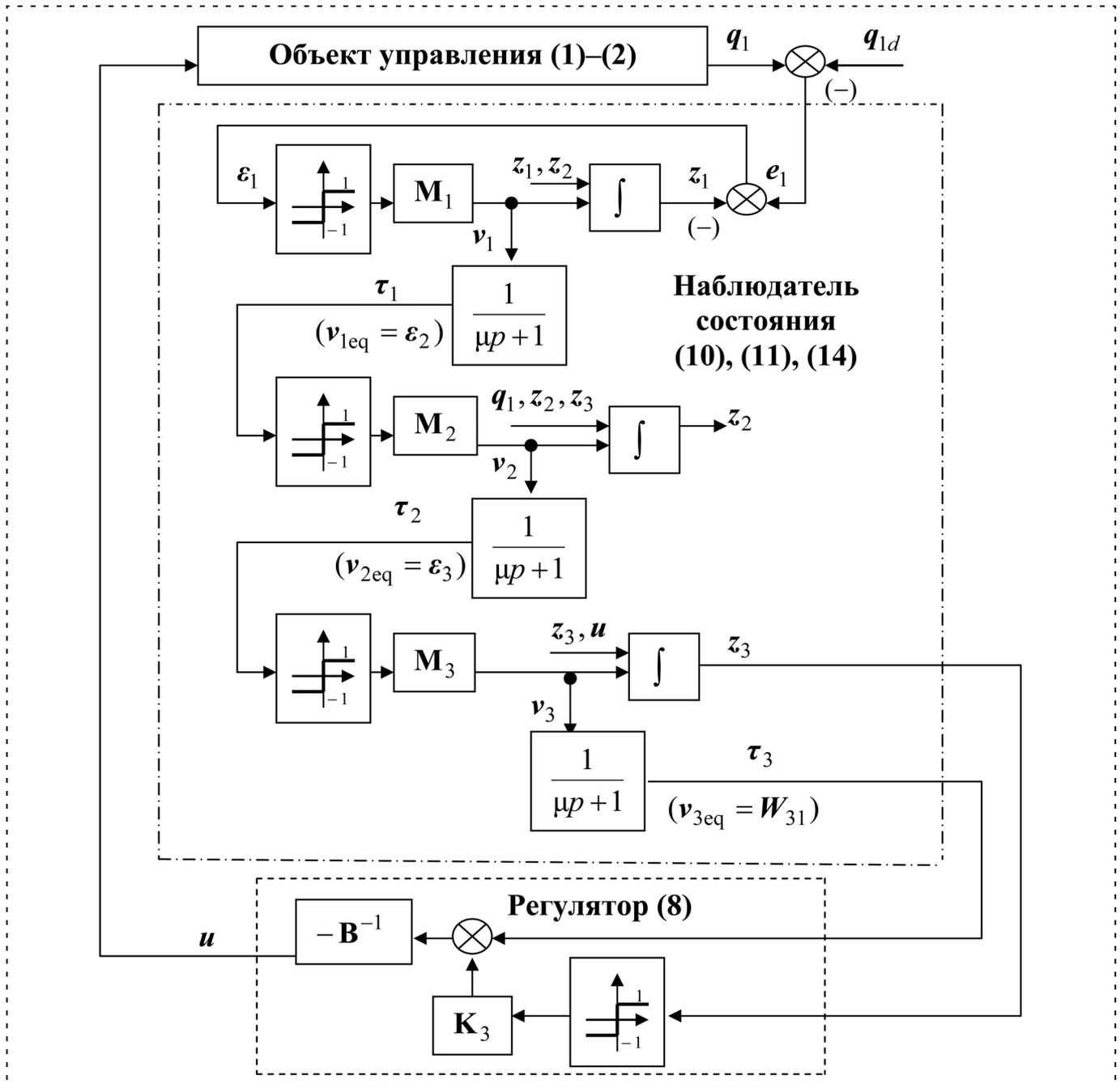


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы с наблюдателем состояния на скользящих режимах

выбираются независимо в каждом блоке на основе неравенств, что существенно упрощает настройку наблюдателей. Заметим, что для реализации разрывного управления (6) достаточно укороченных наблюдателей (10), (12) и $2n$ фильтров (14) для оценивания ε_3 . Тем не менее, построение полного наблюдателя с полным комплектом фильтров позволит организовать автоматическую настройку амплитуды разрывного управления (6) и, следовательно, уменьшить автоколебания в установившемся режиме. Алгоритм настройки амплитуды разрывной обрат-

ной связи (6) в скользящем режиме при $t > t^*$ с учетом (14) имеет вид $k_{3i} > |W_{3i}| \Rightarrow k_{3i}(t) = |\tau_{3i}(t)| + \alpha_i$, $i = \overline{1, n}$, где α_i — произвольные, положительные, сколь угодно малые константы. Аналогичные алгоритмы настройки амплитуд могут быть использованы и для выбора коэффициентов разрывной коррекции наблюдателей состояния на скользящих режимах.

Теперь рассмотрим принципы построения наблюдателя состояния с непрерывными корректирующими воздействиями на основе БФУ 2. В отли-

чие от наблюдателя с разрывной коррекцией наблюдатель с непрерывной коррекцией может обеспечить информационную поддержку только базового закона управления (6) и, кроме того, из-за наличия неопределенностей W_3 в последнем блоке позволяет решить задачу оценивания e_3 с заданной точностью. Тем не менее, необходимость разработки наблюдателя с непрерывной коррекцией обусловлена тем, что, во-первых, при дискретном характере вычисления могут возникнуть проблемы с реализацией разрывной коррекции из-за ограниченности тактовой частоты вычислительных устройств. Во-вторых, на практике и в измеряемых сигналах, и в объекте управления часто присутствуют шумы. С учетом того, что наблюдатель с непрерывной коррекцией имеет структуру фильтра Калмана, при его синтезе могут быть использованы методы оптимальной фильтрации.

С целью разделить процедуру синтеза наблюдателя на независимо решаемые элементарные подзадачи [9] вводится неособая замена переменных $s_1 = e_1$, $s_2 = -L_2 e_1 + e_2$, $s_3 = P e_1 - L_3 e_2 + e_3$, где $P = -L_3 K_2 + L_3 K_1 + L_3^2$, L_j — диагональные матрицы с постоянными элементами, подлежащими определению. Относительно новых переменных с учетом БФУ 2 (5) имеем систему

$$\begin{aligned}\dot{s}_1 &= (L_2 - K_1)s_1 + s_2; \\ \dot{s}_2 &= P_2 s_1 + (L_3 - L_2 + K_1 - K_2)s_2 + s_3; \\ \dot{s}_3 &= P_3 s_1 - L_3 s_3 + H^{-1} B u + W_3,\end{aligned}$$

где $P_2 = L_3(L_2 + K_2 - K_1 - L_3) + L_2 K_1 - L_2^2 - K_2 L_2 + K_1 L_2$; $P_3 = L_3(K_2 K_1 - K_1^2 - L_3 K_2 + L_3^2)$.

На ее основе построен наблюдатель состояния вида

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= (L_2 - K_1)z_1 + z_2 + v_1; \\ \dot{z}_2 &= P_2 z_1 + (L_3 - L_2 + K_1 - K_2)z_2 + z_3 + v_2; \\ \dot{z}_3 &= P_3 z_1 - L_3 z_3 + v_3,\end{aligned}\tag{15}$$

где $z_i \in R^n$ — переменные состояния; $v_i \in R^n$ — корректирующие воздействия наблюдателя, которые выбираются в классе непрерывных линейных функций $v_1 = (L_1 - K_1)\varepsilon_1$; $v_2 = P_2 \varepsilon_1$; $v_3 = P_3 \varepsilon_1$, где $\varepsilon_j = s_j - z_j$, $\varepsilon_j \in R^n$, $j = \overline{1, 3}$.

С помощью второго метода Ляпунова доказано [9], что в системе относительно невязок $\dot{\varepsilon}_1 = (L_2 - L_1)\varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\dot{\varepsilon}_2 = (L_3 - L_2 + K_1 - K_2)\varepsilon_2 + s_3$, $\dot{\varepsilon}_3 = -L_3 \varepsilon_3 + H^{-1} B u + W_3$ обеспечивается заданная точность $|\varepsilon_{ji}| \leq \Delta_{ij}$, $j = \overline{1, 3}$, при последовательном выборе коэффициентов коррекции на основе неравенств

$$l_{3i} > \frac{F_i}{\Delta_{3i}}; l_{2i} > \frac{F_i}{l_{3i} \Delta_{2i}} + l_{3i} + (k_{1i} - k_{2i}) > 0; \tag{16}$$

$$l_{1i} > \frac{F_i}{l_{3i}(l_{2i} - l_{3i} + k_{2i} - k_{1i}) \Delta_{1i}} + l_{2i};$$

$$\sum_{j=1}^n \bar{H}_{ij}^{-1} b_j U_j + \bar{W}_{3i} = F_i; |H_{ij}^{-1}| \leq \bar{H}_{ij}^{-1}, i = \overline{1, n}.$$

С учетом обратных соотношений $e_3 = s_3 + L_3 s_2 + (L_3 L_2 - P) s_1$; $e_2 = s_2 + L_2 s_1$ закон управления (6) будет реализован в виде $u = -K_3 \text{sign } \tilde{e}_3$, где $\tilde{e}_{3i} = e_{3i} \pm \delta_i$; $\delta_i = \Delta_{3i} + l_{3i} \Delta_{2i} + l_{3i}(l_{2i} + k_{2i} - k_{1i} - l_{3i}) \Delta_{1i}$, $i = \overline{1, n}$. Известно [1], что системы с разрывными управлениями грубы к малым неидеальностям, но при их наличии возникает реальный скользящий режим, что приводит к решению задачи слежения (3) с некоторой точностью. При наличии шумов в измерениях при выборе коэффициентов (16) потребуются искать компромисс между требуемой точностью оценивания $\delta_i(\Delta_{ji}) \leq \bar{\delta}$ и удовлетворительными фильтрующими свойствами.

1.4. Сравнительный анализ разработанных процедур синтеза

В данном разделе рассмотрены процедуры блочного синтеза обратной связи пяти типов, обеспечивающие (3) в системе (1)–(2). В табл. 1 представлены основные результаты сравнительного анализа данных процедур.

Для решения конкретной задачи разработчик выбирает ту процедуру, которая комплексно отвечает цели управления, технологическим требованиям и имеющимся аппаратурным и вычислительным возможностям.

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность разработанных процедур синтеза, рассмотрим задачу управления двухзвенным манипулятором с тремя степенями свободы типа UMS-2, предназначенным для переноса объекта в рабочем пространстве. Компоненты вектора состояния такого манипулятора $q_1 = \text{col}(q_{11}, q_{12}, q_{13})$ совершают

Характеристики	БФУ 1 (4)		БФУ 2 (5)		
	I (6)	II (8)	III (6)	IV (6)	V (9)
Номер процедуры					
Закон управления	(6)	(8)	(6)	(6)	(9)
Наблюдатель состояния	(10), (14)	(10), (11), (14)	(15)	(12), (14)	(12)—(14)
Автономное управление	Не обеспечивается		Обеспечивается		
Качество установившихся режимов	Хуже	Высокое	Хуже		Высокое
Знание параметров \mathbf{H}^{-1}	Требуется		Не требуется		Требуется
Размерность наблюдателя состояния	$4n$	$6n$	$3n$	$4n$	$6n$
Необходимость в дополнительной фильтрации измерений	В общем случае есть		Нет	В общем случае есть	
Потребление ресурсов управления	Избыточное	Экономное	Избыточное		Экономное
Требования к аппаратурной реализации комбинированного управления	Нет	Есть	Нет	Нет	Есть

вращательные, вертикальные линейные и горизонтальные линейные движения соответственно. Составляющие оператора объекта управления в обозначениях (1) имеют вид $\mathbf{H}_{3 \times 3} = \text{diag}(H_i)$; $\mathbf{C}\mathbf{q}_2 = \text{col}(C_1, C_2, C_3)$;

$$H_1 = (m'_3 + m_3)q_{13}^2 + m'_3 l q_{13} + m'_3 \frac{l^2}{3} + I_1 + I_2; \quad (17)$$

$$H_2 = m_2 + m'_3 + m_3; \quad H_3 = m'_3 + m_3;$$

$$C_1 = 2[(m'_3 + m_3)q_{13} - m'_3 \frac{l}{2}]q_{23}q_{21};$$

$$C_2 = 0, \quad C_3 = [m'_3 \frac{l}{2} - (m'_3 + m_3)q_{13}]q_{21}^2;$$

$$G_1 = 0, \quad G_2 = (m_2 + m'_3 + m_3)g, \quad G_3 = 0.$$

Конечная точка манипулятора (центр масс схвата с грузом) двигается по заданной пространственной траектории посредством управления движением звеньев манипулятора. Каждое звено оснащается электроприводом и датчиком положения звена. Вектор обобщенных координат конечной точки $\mathbf{y}_1(t) \in R^3$ как функция времени технологического процесса формируется через вектор обобщенных координат звеньев манипулятора $\mathbf{q}_1(t)$, который в жесткой механической системе, по сути, является вектором обобщенных координат приводов. В данном простейшем случае обратная задача о положении имеет однозначное аналитическое решение.

Моделирование проводили при следующих параметрах [3]: $I_1 = 0,029$ [кг·м²] — приведенный мо-

мент инерции частей манипулятора, участвующих во вращательном движении; $m_2 = 7$ [кг] — приведенная масса частей, участвующих в поступательном вертикальном движении; $I_2 = 0,055$ [кг·м²] — момент инерции этих частей, приведенный к вертикальной оси; $m'_3 = 5,6$ [кг] — масса руки, которая представлена однородным стержнем длиной $l = 0,5$ [м]; $m_3 = [0,1 \div 3]$ [кг] — точечная масса схвата с грузом; $g = 9,8$ [м/с²] — ускорение свободного падения; $\eta_i(t) = 0,01 \sin 5t$, $i = \overline{1, 3}$; в модели ИУ: $\mathbf{A} = \text{diag}(465)$, $\mathbf{D} = \text{diag}(22)$, $\mathbf{B} = \text{diag}(35)$, $U_i = 24$ [В].

Требовалось обеспечить равномерное движение конечной точки манипулятора по пространственной окружности, параметры которой пересчитаны в эталонные траектории звеньев: $q_{11d} = 0,5 \sin 0,5t$ [рад], $q_{12d} = 0,5 \cos 0,5t$, $q_{13d} = 0,5 \sin 0,5t$ [м]. Результаты моделирования процедур синтеза (табл. 1) приведены на рис. 2—6 для вращательной степени подвижности q_{11} .

2. Решение задачи слежения с заданной точностью

2.1. Описание модели объекта управления. Постановка задачи

Математическую модель механической подсистемы системы (1)—(2) с n степенями свободы представим в виде

$$\dot{\mathbf{q}}_1 = \mathbf{q}_2, \quad \dot{\mathbf{q}}_2 = \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{q}_1)[\mathbf{v} - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)\mathbf{q}_2 + \boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{f}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, t)], \quad (18)$$

где $\mathbf{H}_0 > 0$, $\mathbf{H}_0^{-1} > 0$, \mathbf{C}_0 — функционально и параметрически определенные матрицы размерности

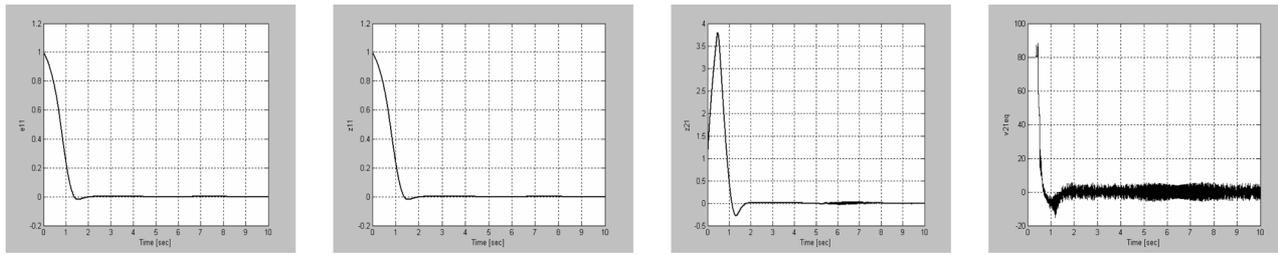


Рис. 2. Процедура I: $e_{11}(t), z_{11}(t), z_{21}(t), v_{21eq}(t) = \varepsilon_{31}(t)$

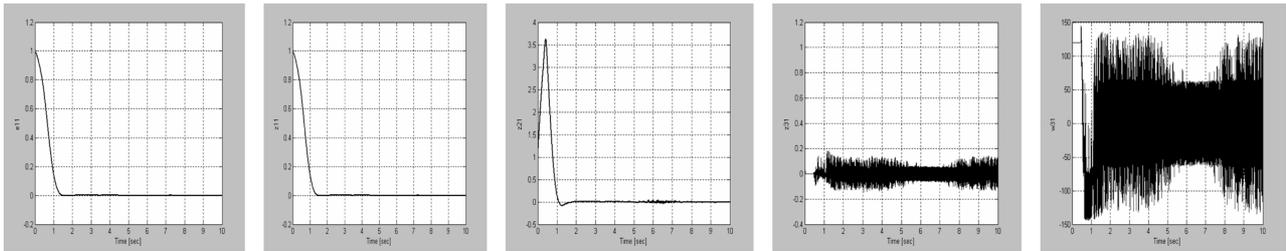


Рис. 3. Процедура II: $e_{11}(t), z_{11}(t), z_{21}(t), z_{31}(t), v_{31eq}(t) = W_{31}(t)$

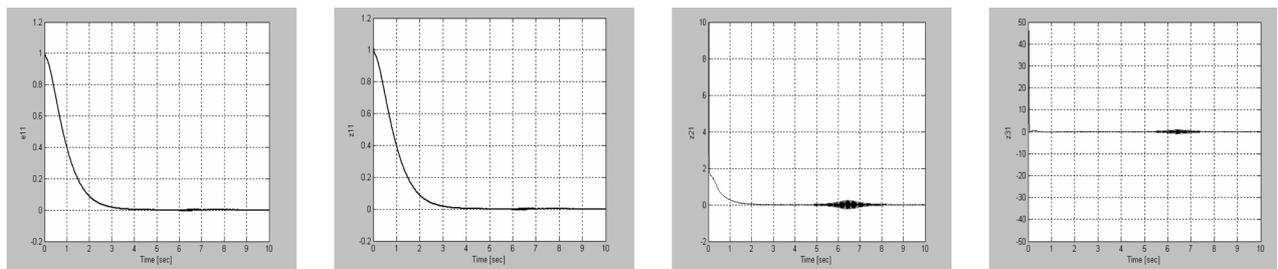


Рис. 4. Процедура III: $e_{11}(t), z_{11}(t), z_{21}(t), z_{31}(t)$

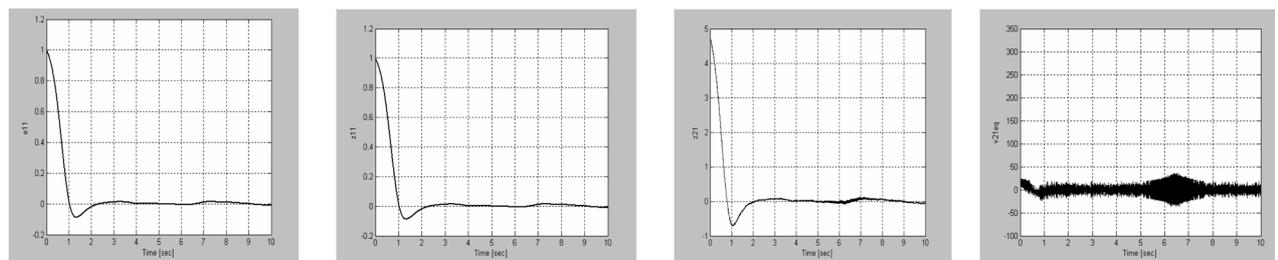


Рис. 5. Процедура IV: $e_{11}(t), z_{11}(t), z_{21}(t), v_{21eq}(t) = \varepsilon_{31}(t)$

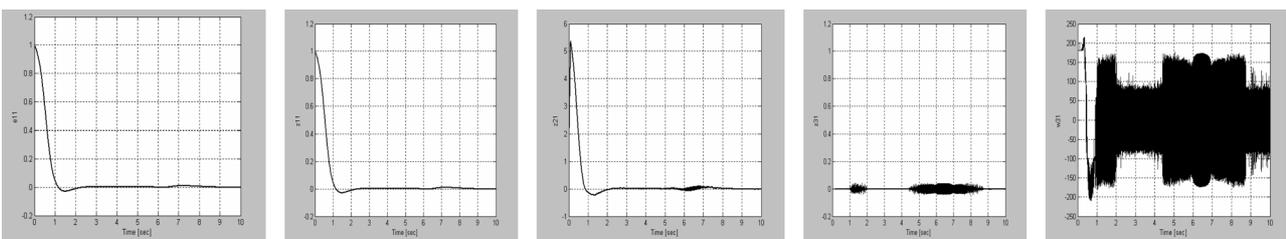


Рис. 6. Процедура V: $e_{11}(t), z_{11}(t), z_{21}(t), z_{31}(t), v_{31eq}(t) = W_{31}(t)$

$n \times n$; $f(q_1, q_2, t) \in R^n$ — вектор параметрических и функциональных неопределенностей, который может включать существенные нелинейности, в том числе разрывные зависимости типа сухого трения. Остальные обозначения соответствуют модели (1).

Также рассматривается задача слежения за заданными траекториями положений звеньев манипулятора. В отличие от предыдущего раздела предполагается, что производные задающих воздействий $\dot{q}_{1d}(t) = \dot{q}_{2d}(t)$, неопределенности оператора $f(q_1, q_2, t)$ и внешние возмущения $\eta(t)$ описываются неизвестными негладкими ограниченными функциями времени $\|q_{1d}\| \leq S_1$, $\|q_{2d}\| \leq S_2$, $\|f\| \leq F$, $\|\eta\| \leq N \forall t \geq 0$, где S_1, S_2, N, F — известные константы. При детализации алгоритмов используются покомпонентные оценки $|q_{1di}| \leq S_{1i}$, $i = \overline{1, n}$, и т. п.

Особенность модели (18), (2) заключается в том, что негладкие неопределенности, не подлежащие дифференцированию, не принадлежат пространству управления u , возможность их компенсации отсутствует. Кроме того, их наличие приводит к потере наблюдаемости и требует большего объема измерений [5, 9]. В предположении, что для измерений доступны не только положения звеньев манипулятора q_1 , но и токи якоря электроприводов, пересчитанные в электрические моменты v , ставится задача синтеза обратной связи, обеспечивающей сходимость в заданную окрестность программных траекторий

$$\|q_1 - q_{1d}\| < \delta_1 \text{ или } |q_{1i} - q_{1di}| < \delta_{1i}, i = \overline{1, n}. \quad (19)$$

2.2. Базовые законы управления

Для системы (18), (2) с помощью неособых зам. переменных $e_1 = q_1 - q_{1d}$; $e_2 = q_2 + K_1 e_1$; $e_3 = v - v^*$ ($e_i \in R^n$) получено два типа блочных форм управляемости с учетом возмущений (БФУВ), которые отличаются выбором задания v^* на управляющие моменты и вычислительной реализацией.

БФУВ 1, на основе которой решается задача слежения относительно обобщенных координат без компенсации перекрестных связей, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -K_1 e_1 + e_2 - \dot{q}_{2d}; \\ \dot{e}_2 &= H_0^{-1} [e_3 - K_2 e_2 - C_0 e_2 + \eta + f + W_2]; \\ \dot{e}_3 &= -Ae_3 + W_3 + Bu; \\ e_3 &= v + K_2(q_2 + K_1(q_1 - q_{1d})), \end{aligned} \quad (20)$$

где $v^* = -K_2 e_2$; $W_2 = C_0 K_1 e_1 + H_0 K_1 (e_2 - K_1 e_1 - \dot{q}_{2d})$, в силу механической природы рассматриваемого объекта предполагается $\|W_2\| \leq L_0 + L_1 \|e_1\| + L_2 \|e_2\|$,

$L_{0,1,2} = \text{const} > 0$; $W_3 = DK_1 e_1 + (AK_2 - D)e_2 + K_2 H_0^{-1} [e_3 - K_2 e_2 - C_0 e_2 + \eta + f + W_2]$, $|W_{3i}| \leq W_{3i}$, $i = \overline{1, n}$. Коэффициенты обратной связи $K_j = \text{diag}(k_{ji})$, $j = 1, 2$, $i = \overline{1, n}$ (здесь для простоты изложения $k_{ji} = k_j > 0$) выбираются на основе неравенств, полученных с помощью второго метода Ляпунова при исследовании достаточных условий сходимости невязок e_1 в заданную окрестность (19), где также реализуется принцип декомпозиции. Последовательный анализ слагаемых квадратичной формы $V = V_1 + V_2$, $V_j = \frac{1}{2} e_j^T e_j > 0 \forall e_j \neq 0$ и их полных производных $\dot{V}_j < 0, j = 1, 2$, привел к следующим результатам:

- 1) $\|e_1\| \leq \delta_1$ при $\bar{k}_i > S_2/\delta_{1i}$, $\tilde{k}_1 > \|e_2\|/\delta_1 \Rightarrow \|e_2\| < \tilde{k}_1 \delta_1 = \delta_2$ — точность, которую требуется обеспечить при стабилизации невязок e_2 , $k_1 = \bar{k}_i + \tilde{k}_1$;
- 2) $\|e_2\| \leq \delta_2$ при $k_2 > L_1/k_1 + L_2 + (N + F + L_0 + L_1 S_2/k_1)/\tilde{k}_1 \delta_1$.

БФУВ 2, в которой реализуется метод динамической декомпозиции и автономное управление выходными координатами, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -K_1 e_1 + e_2 - \dot{q}_{2d}; \\ \dot{e}_2 &= -K_2 e_2 + H_0^{-1} [e_3 + \eta + f] - K_1 \dot{q}_{2d}; \\ \dot{e}_3 &= -Ae_3 + W_3 + Bu; \\ e_3 &= v - C_0 q_2 + H_0 ((K_2 + K_1) q_2 + K_2 K_1 (q_1 - q_{1d})), \end{aligned} \quad (22)$$

где $v^* = -H_0 [K_2 e_2 + K_1 (e_2 - K_1 e_1)] + C_0 q_2$; $K_j = \text{diag}(k_{ji}) > 0, j = 1, 2, |W_{3i}| \leq \bar{W}_{3i}, i = \overline{1, n}$; $W_3 = (AC_0 + D + \dot{C}_0 + (H_0 K_1 - AH_0 - C_0 - \dot{H}_0) K_1) K_1 e_1 + ((AH_0 + C_0 + \dot{H}_0)(K_2 + K_1) - AC_0 - D - \dot{C}_0 - H_0(K_2 + K_1)K_2 - H_0 K_1^2) e_2 + (H_0(K_2 + K_1) - C_0) \times H_0^{-1} (e_3 + \eta + f) - H_0 K_2 K_1 \dot{q}_{2d}$.

С помощью второго метода Ляпунова получены покомпонентные оценки:

- 1) $|e_{1i}| \leq \delta_{1i}$ при $\bar{k}_{1i} > S_{2i}/\delta_{1i}$, $\tilde{k}_{1i} > |e_{2i}|/\delta_{1i} \Rightarrow |e_{2i}| < \tilde{k}_{1i} \delta_{1i} = \delta_{2i}$ — точность, которую требуется обеспечить при стабилизации e_{2i} , $k_{1i} = \bar{k}_{1i} + \tilde{k}_{1i}$, $i = \overline{1, n}$;

$$2) |e_{2i}| \leq \delta_{2i} \text{ при } k_{2i} > \left(\sum_{j=1}^n (\bar{\mathbf{H}}_0^{-1})_{ij} [N_j + F_j] + k_{1i} S_{2i} / (\tilde{k}_{1i} \delta_{1i}) \right), |(\mathbf{H}_0^{-1})_{ij}| \leq (\bar{\mathbf{H}}_0^{-1})_{ij}.$$

В терминах БФУВ (20), (22), где векторы \mathbf{q}_{2d} , $\boldsymbol{\eta}$, \mathbf{f} , \mathbf{W}_2 трактуются как неизвестные ограниченные возмущения, не подлежащие компенсации, разработаны два типа базовых законов управления. Разрывное управление

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_3 \text{sign} \mathbf{e}_3 \quad (24)$$

приводит третьи блоки БФУВ (20) и (22) к виду $\dot{\mathbf{e}}_3 = -\mathbf{A}\mathbf{e}_3 + \mathbf{W}_3 - \mathbf{B}\mathbf{K}_3 \text{sign} \mathbf{e}_3$, где при выполнении достаточных условий $e_{3i} \dot{e}_{3i} < 0 \Rightarrow \bar{W}_{3i}/b_i < k_{3i}$, $i = \overline{1, n}$, за конечное время t^* возникает скользящий режим на многообразии $\mathbf{e}_3 = 0$. При $t > t^*$ поведение переменных замкнутых систем (20) и (24), (22) и (24) описывается следующей логической цепочкой:

$$\mathbf{e}_3 = 0 \Rightarrow \|\mathbf{e}_2\| < \delta_2 \Rightarrow \|\mathbf{e}_1\| < \delta_1, \quad (25)$$

что и решает поставленную задачу (19), которая может быть реализована, если при выбранных \mathbf{K}_j ($j = \overline{1, 3}$) выполняются неравенства $k_{3i} \leq U_i$, $i = \overline{1, n}$.

Формирование комбинированного управления в БФУВ (20) и (22)

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{W}_3 + \mathbf{K}_3 \text{sign} \mathbf{e}_3) \quad (26)$$

приведет к замкнутым подсистемам $\dot{\mathbf{e}}_3 = -\mathbf{A}\mathbf{e}_3 - \mathbf{K}_3 \text{sign} \mathbf{e}_3$, где $\forall k_{3i} > 0$ за конечное время возникнет скользящий режим на многообразии $\mathbf{e}_3 = 0$, что обеспечивает (25). Диапазон допустимых значений k_{3i} : $0 < k_{3i} \leq b_i U_i - \bar{W}_{3i}$, $i = \overline{1, n}$.

2.3. Информационное обеспечение базовых законов управления

В данном параграфе для информационного обеспечения законов управления (24), (26) на основе измерений $\mathbf{q}_1(t)$, $\mathbf{v}(t)$ разработаны принципы построения наблюдателей состояния различных типов. Полученные БФУВ (20), (22) не являются наблюдаемыми из-за наличия негладких возмущений [5, 9]. Ставится задача оценивания обобщенных скоростей \mathbf{q}_2 с помощью наблюдателей состояния, имеющих структуру системы (18), с тем чтобы полученные оценки использовать для вычислений текущих значений \mathbf{e}_3 (21) или (23).

Вначале рассмотрим принципы построения наблюдателей состояния с разрывной коррекцией, функционирующих в скользящем режиме:

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_1 [\dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{v}_1]; \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}_2 &= \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{q}_1)(\mathbf{v} - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{z}_2)\mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_2); \\ \dot{\mathbf{z}}_3 &= -\mathbf{A}\mathbf{z}_3 + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{v}_3, \end{aligned} \quad (28)$$

где $\mathbf{z}_j \in R^n$ ($j = \overline{1, 3}$) — переменные состояния; $\mathbf{v}_j \in R^n$ — корректирующие воздействия наблюдателя, которые последовательно выбираются в каждом блоке в классе разрывных функций так, чтобы решить задачу стабилизации относительно невязок $\boldsymbol{\varepsilon}_j = \mathbf{q}_j - \mathbf{z}_j$, $j = 1, 2$, $\boldsymbol{\varepsilon}_3 = \mathbf{e}_3 - \mathbf{z}_3$:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 &= \boldsymbol{\varepsilon}_2 - \mathbf{v}_1[\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = \mathbf{q}_2 - \mathbf{v}_1]; \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = \mathbf{H}_0^{-1}(\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{f} - \mathbf{v}_2); \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 &= -\mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}_3 + \mathbf{W}_3 + \mathbf{v}_3, \end{aligned}$$

где $\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{z}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2)(\mathbf{z}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2) - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{z}_2)\mathbf{z}_2$, $\|\boldsymbol{\alpha}\| \leq L\|\boldsymbol{\varepsilon}_2\|$, $L = \text{const} > 0$.

Ниже представлена пошаговая процедура синтеза разрывных корректирующих воздействий наблюдателей состояния (27)–(28), которая организована аналогично процедуре из параграфа 1.3.

Шаг 1. В первом блоке наблюдателя состояния (27) разрывное корректирующее воздействие $\mathbf{v}_1 = \mathbf{M}_1 \text{sign} \boldsymbol{\varepsilon}_1$ (здесь для простоты изложения $\mathbf{M}_j = \text{diag}(m_{ji})$, $m_{ji} = m_j > 0$, $j = \overline{1, 3}$, $i = \overline{1, n}$) при выполнении достаточных условий $\boldsymbol{\varepsilon}_1^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 < 0 \Rightarrow m_1 > \|\boldsymbol{\varepsilon}_2\|$ [$m_1 > \|\mathbf{q}_2\|$] приведет к возникновению за конечное время t_1 скользящего режима на многообразии $S_1 = \{\boldsymbol{\varepsilon}_1 = 0\} \Rightarrow \mathbf{z}_1 = \mathbf{q}_1$. Из уравнений статики получим эквивалентное управление $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = 0 \Rightarrow \mathbf{v}_{1\text{eq}} = \boldsymbol{\varepsilon}_2$ [$\mathbf{v}_{1\text{eq}} = \mathbf{q}_2$], которое используется для синтеза корректирующих воздействий во втором блоке наблюдателя (28).

Шаг 2. Формируем $\mathbf{v}_2 = \mathbf{M}_2 \text{sign} \mathbf{v}_{1\text{eq}}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_2^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 < 0 \Rightarrow m_2 > N + F$. При $t_2 > t_1$ имеем $S_2 = \{S_1 \cap \boldsymbol{\varepsilon}_2 = 0\} \Rightarrow \mathbf{z}_2 = \mathbf{q}_2$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = 0 \Rightarrow \mathbf{v}_{2\text{eq}} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{f}$.

Шаг 3. Вычислив \mathbf{e}_3 (21) или (23), формируем $\mathbf{v}_3 = \mathbf{M}_3 \text{sign} \boldsymbol{\varepsilon}_3$, $\boldsymbol{\varepsilon}_3^T \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 < 0 \Rightarrow m_3 > \bar{W}_3$. При $t_3 > t_2$ имеем: $S_3 = \{S_2 \cap \boldsymbol{\varepsilon}_3 = 0\} \Rightarrow \mathbf{z}_3 = \mathbf{e}_3$, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_3 = 0 \Rightarrow \mathbf{v}_{3\text{eq}} = \mathbf{W}_3$.

Текущие значения эквивалентных управлений $\mathbf{v}_{j\text{eq}}$, $j = \overline{1, 3}$, также получим с выходов линейных фильтров (14). Для реализации разрывного управ-

ления (24) достаточно укороченного наблюдателя состояния (27) и n фильтров (14) для оценивания \mathbf{q}_2 и вычисления \mathbf{e}_3 (21), (23). Полный наблюдатель состояния (27)—(28) позволяет дополнительно получить оценки неопределенностей \mathbf{W}_3 для формирования комбинированного управления (26).

Теперь рассмотрим принципы построения наблюдателя состояния с непрерывной коррекцией, который в силу наличия неопределенностей во втором уравнении системы (18) позволяет решить задачу оценивания \mathbf{q}_2 с заданной точностью. С целью разделить задачу синтеза наблюдателя на независимо решаемые элементарные подзадачи введем особую замену переменных $\mathbf{s}_1 = \mathbf{q}_1$, $\mathbf{s}_2 = -\mathbf{L}_2\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2$. Относительно новых переменных получена система

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}}_1 &= \mathbf{s}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{s}_1; \\ \dot{\mathbf{s}}_2 &= -\mathbf{L}_2^2\mathbf{s}_1 + \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{q}_1) \times \\ &\times [\mathbf{v} - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)\mathbf{q}_2 + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{f}] - \mathbf{L}_2\mathbf{s}_2, \end{aligned}$$

на основе которой построим наблюдатель состояния вида

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{z}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{z}_1 + \mathbf{v}_1; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}_2 &= -\mathbf{L}_2^2\mathbf{z}_1 + \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{q}_1) \times \\ &\times [\mathbf{v} - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, (\mathbf{z}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{q}_1))(\mathbf{z}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{q}_1)] - \mathbf{L}_2\mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_2, \end{aligned}$$

где $\mathbf{z}_j \in R^n$ — переменные состояния; $\mathbf{v}_j \in R^n$ — линейные корректирующие воздействия наблюдателя

$\mathbf{v}_1 = \mathbf{L}_1\boldsymbol{\varepsilon}_1$, $\mathbf{v}_2 = -\mathbf{L}_2^2\boldsymbol{\varepsilon}_1$, где $\boldsymbol{\varepsilon}_j = \mathbf{s}_j - \mathbf{z}_j$, $\mathbf{L}_j = \text{diag}\{l_{ji}\}$, $l_{ji} = l_j > 0$, $j = 1, 2$, $i = \overline{1, n}$. С помощью второго метода Ляпунова доказано [9], что в системе относительно невязок

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = (\mathbf{L}_2 - \mathbf{L}_1)\boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2;$$

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 &= \mathbf{H}_0^{-1}(\mathbf{q}_1)[- \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)\boldsymbol{\varepsilon}_2 + \\ &+ \Delta\mathbf{C}_0\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \Delta\mathbf{C}_0\mathbf{q}_2 + \boldsymbol{\eta} + \mathbf{f}] - \mathbf{L}_2\boldsymbol{\varepsilon}_2, \end{aligned}$$

где $\Delta\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{z}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{q}_1) - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}_1, \mathbf{z}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{q}_1)$; $\|\Delta\mathbf{C}_0\| < \bar{C} \|\boldsymbol{\varepsilon}_2\|$; $\|\mathbf{q}_2\| \leq \bar{Q}_2$; $\bar{H}_0 \leq \|\mathbf{H}_0(\mathbf{q}_1)\| \leq \bar{H}_0 \forall \mathbf{q}_1 \in Q_1$, \bar{C} , \bar{Q}_2 , \bar{H}_0 , $\bar{H}_0 = \text{const} > 0$, можно обеспечить заданную точность стабилизации $\|\boldsymbol{\varepsilon}_j\| \leq \Delta_j$, $j = 1, 2$, при последовательном выборе коэффициентов коррекции на основе следующих неравенств:

$$l_2 > \frac{1}{H_0} \left(\frac{N+F}{\Delta_2} + \bar{C} \bar{Q}_2 \right); l_1 > \frac{N+F}{(\bar{H}_0 l_2 - \bar{C} \bar{Q}_2) \Delta_1} + l_2.$$

С учетом обратных замен переменных $\tilde{\mathbf{q}}_2 = \mathbf{z}_2 + \mathbf{L}_2\mathbf{z}_1$ компоненты вектора \mathbf{q}_2 оцениваются с точностью $\|\mathbf{q}_2 - \tilde{\mathbf{q}}_2\| \leq \Delta$, $\Delta = \Delta_2 + l_2\Delta_1$, определяющей точность расчетных значений компонент вектора \mathbf{e}_3 по формулам (21) или (23).

На рис. 7 показана структурная схема замкнутой системы (20), (21), (24) с наблюдателем состояния с непрерывной коррекцией (29).

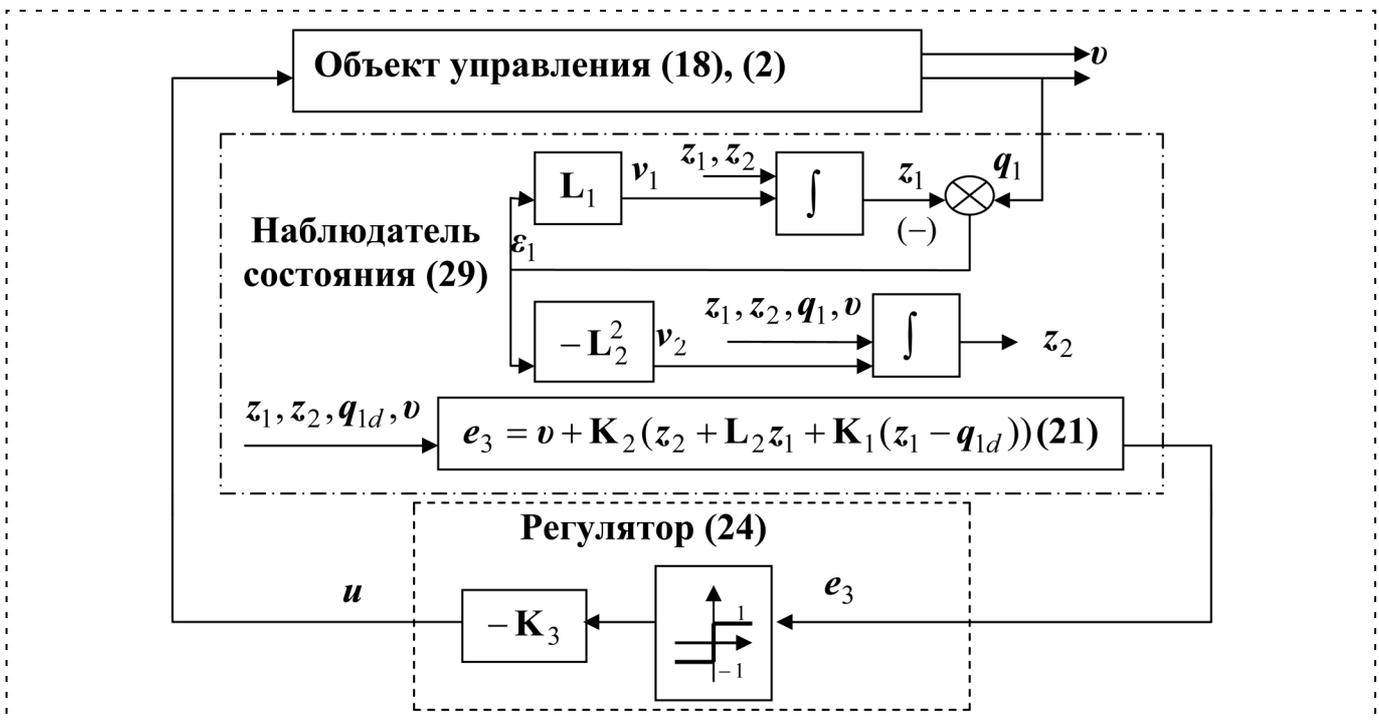


Рис. 7. Структурная схема замкнутой системы (20), (21), (24), (29)

2.4. Сравнительный анализ разработанных процедур синтеза

В данном разделе разработаны процедуры блочного синтеза обратной связи шести типов, обеспечивающие (19) в системе (18), (2). В табл. 2 представлены основные результаты сравнительного анализа данных процедур.

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность разработанных процедур, также рассматривали систему управления манипулятором (17).

Моделирование проводили при указанных в параграфе 1.4 параметрах.

При действии внешних негладких возмущений (рис. 8) ставилась задача обеспечить заданную точность $|e_{1i}| \leq \delta_{1i} = 0,02$ при возвратно-поступательных движениях конечной точки робота по пространственной прямой (рис. 9), параметры которой пересчитаны в эталонные траектории звеньев q_{1di} , $i = 1, 2, 3$.

Результаты моделирования разработанных процедур синтеза обратной связи (табл. 2) приведены на рис. 10–15 для всех степеней подвижности.

Таблица 2

Характеристики	БФУВ 1 (20)			БФУВ 2 (22)		
	I	II	III	IV	V	VI
Номер процедуры						
Закон управления	(24)	(24)	(26)	(24)	(24)	(26)
Наблюдатель состояния	(29)	(27), (14)	(27), (28), (14)	(29)	(27), (14)	(27), (28), (14)
Автономное управление	Не обеспечивается			Обеспечивается		
Вычисление H_0, C_0	Да	Нет	Да	Да		
Размерность наблюдателя состояния	$2n$	$2n$	$6n$	$2n$	$2n$	$6n$
Необходимость в дополнительной фильтрации измерений	Нет	Есть	Есть	Нет	Есть	Есть
Потребление ресурсов управления	Избыточное		Экономное	Избыточное		Экономное
Качество установившихся режимов	Хуже		Высокое	Хуже		Высокое
Требования к аппаратурной реализации комбинированного управления	Нет		Есть	Нет		Есть

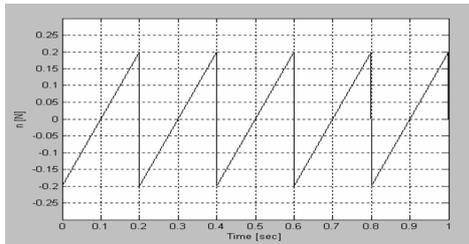


Рис. 8. $\eta_{1, 2, 3}(t)$

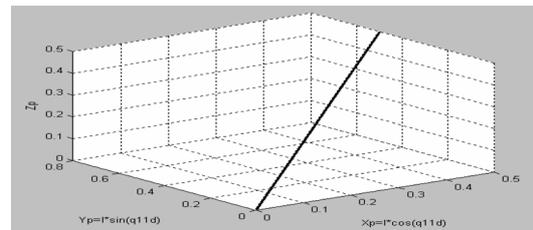


Рис. 9. $y_1(t)$

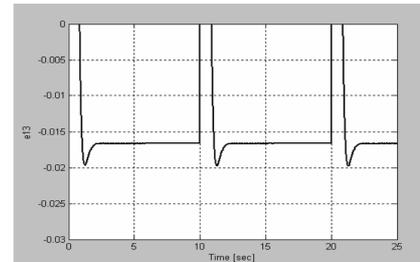
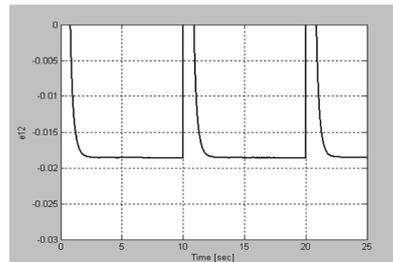
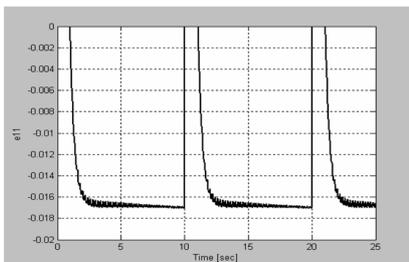


Рис. 10. Процедура I: $e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$, $e_{13}(t)$

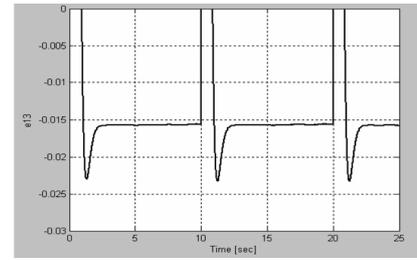
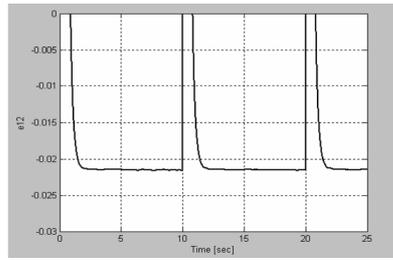
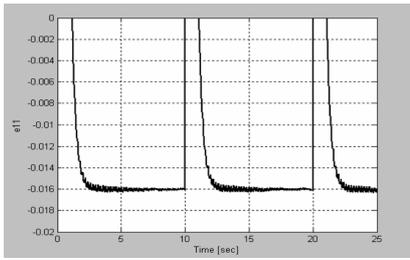


Рис. 11. Процедура II: $e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$, $e_{13}(t)$

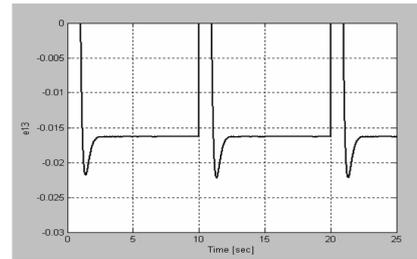
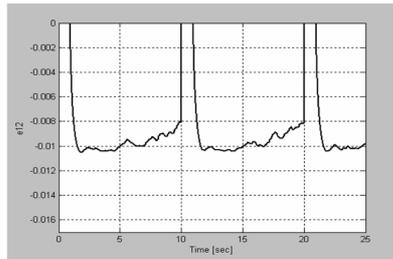
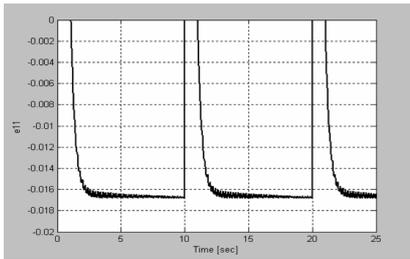


Рис. 12. Процедура III: $e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$, $e_{13}(t)$

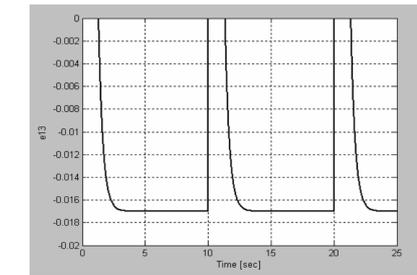
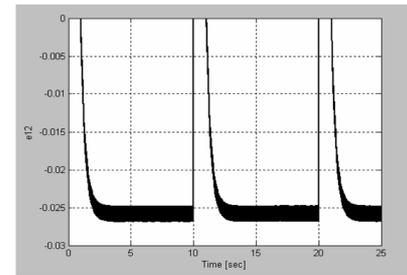
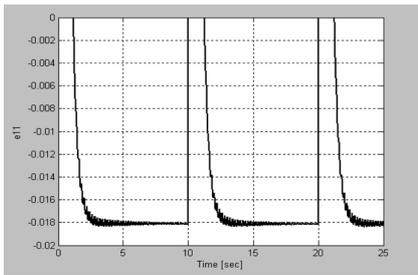


Рис. 13. Процедура IV: $e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$, $e_{13}(t)$

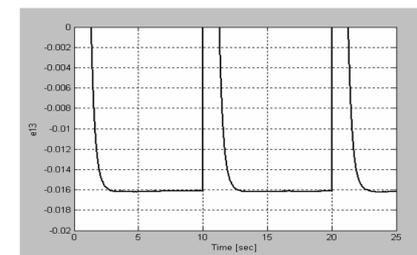
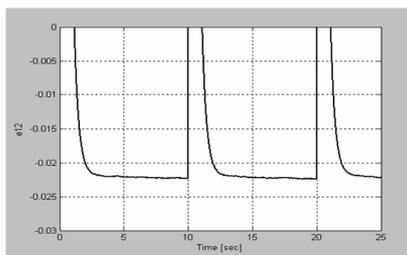
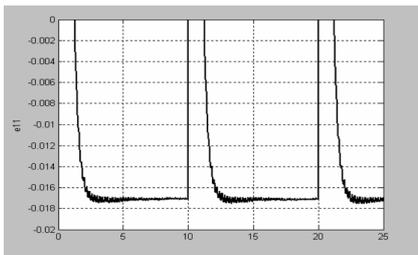


Рис. 14. Процедура V: $e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$, $e_{13}(t)$

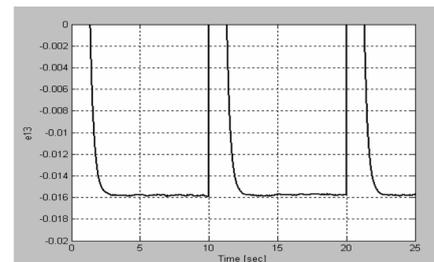
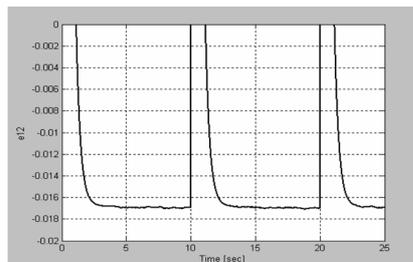
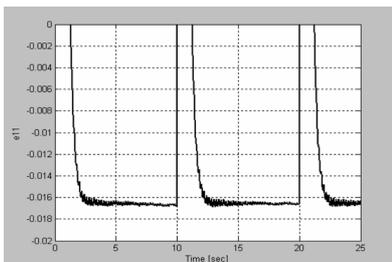


Рис. 15. Процедура VI: $e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$, $e_{13}(t)$

В данной статье в рамках блочного подхода представлены следующие результаты, полученные при исследовании задач управления электромеханическими системами в пространстве обобщенных координат манипулятора:

1) процедуры приведения математических моделей электромеханических систем к блочным формам управляемости относительно выходных переменных (обобщенных координат манипулятора) и методы формирования управляющих моментов с учетом неопределенностей объекта управления и внешних возмущений различного класса;

2) процедуры блочного синтеза базовых законов управления в задачах слежения за заданными траекториями обобщенных координат, в частности, с обеспечением автономного управления;

3) процедуры блочного синтеза наблюдателей состояния с разрывной коррекцией, позволяющие за теоретически конечное время получить оценки преобразованных переменных, а также имеющих операторных неопределенностей и внешних возмущений; процедуры иерархической настройки наблюдателей состояния с непрерывной коррекцией.

Эффективность разработанных процедур подтверждена результатами моделирования. Практи-

ческая значимость полученных результатов заключается в том, что их реализация приведет к достижению значительного технико-экономического эффекта в электромеханических системах различного назначения, функционирующих в условиях функциональной неопределенности, действия внешних возмущений и при неполных измерениях фазовых переменных.

Список литературы

1. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1987.
2. Черноусько Ф. Л., Ананьенский И. М., Решмин С. А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006.
3. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
4. Матюхин В. И. Универсальные законы управления механическими системами. М.: МАКС Пресс, 2001.
5. Краснова С. А. Каскадный синтез системы управления манипулятором с учетом динамики электроприводов // АиТ. 2001. № 11. С. 51–72.
6. Дракунов С. В., Изосимов Д. Б., Лукьянов А. Г., Уткин В. А., Уткин В. И. Принцип блочного управления // АиТ. 1990. № 5. С. 3–13.
7. Уткин В. А. Инвариантность и автономность в системах с разделяемыми движениями // АиТ. 2001. № 11. С. 73–94.
8. Уткин А. В. Метод расширения пространства состояния в задаче автономного управления // АиТ. 2007. № 6. С. 81–98.
9. Краснова С. А., Уткин В. А. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем. М.: Наука, 2006.

ИНФОРМАЦИЯ

28 сентября—4 октября 2009 г.

пос. Дивноморское Геленджикский район, Краснодарский край

В рамках Международной научно-технической мультikonференции

"Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники" (ИКТМР-2009)

состоится локальная научно-техническая конференция

"МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ" (МВУС-2009)

Председатель — член-корр. РАН И. А. Каляев

Направления работы конференции

- ◆ Фундаментальные проблемы создания многопроцессорных вычислительных и управляющих систем.
- ◆ Архитектура, системное и прикладное программное обеспечение многопроцессорных вычислительных и управляющих систем.
- ◆ Проблемно-ориентированные высокопроизводительные многопроцессорные вычислительные и управляющие системы.
- ◆ Распределенные вычисления и мультиагентные технологии.
- ◆ Нейрокомпьютеры и нейросетевые технологии.
- ◆ Системы цифровой обработки сигналов и изображений, анализа данных и распознавания объектов.

Подробную информацию о мультikonференции ИКТМР-2009 и локальной конференции МВУС-2009 см. на сайте <http://www.mvs.tsure.ru>

Л. М. Яковис, д-р техн. наук, проф.,
К. В. Спорягин, аспирант,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
sporyagin.kv@sysauto.ru

Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления

Рассматриваются методы расчета параметров типовых регуляторов для многосвязных объектов с различной инерционностью и запаздыванием в каналах передачи управляющих воздействий, базирующиеся на комплексном применении теории управления и компьютерного имитационного моделирования.

Ключевые слова: типовые регуляторы, многосвязные объекты управления, инерционность, запаздывание, имитационное моделирование.

Введение. К типовым принято относить пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегральный (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) законы регулирования. При правильной настройке они наиболее рациональным образом сочетают быстроту реакции (П-составляющая) с осмотрительностью (И-составляющая) и элементами прогноза будущего (Д-составляющая). Разработчики обращаются к проверенным десятилетиями практики автоматизации типовым регуляторам, поскольку они просто реализуются средствами проектирования SCADA-систем, не предъявляют жестких требований к знанию модели объекта управления и не требуют вычисления производных высокого порядка, что чревато значительными погрешностями в условиях сильных измерительных помех. Здесь разработчиков или наладчиков систем на объекте могут ждать, однако, серьезные трудности. Обычный способ введения связей от каждого из регулируемых параметров к соответствующему управляющему воздействию (автономная система регулирования) при наличии перекрестных связей и запаздываний в объекте нередко приводит к снижению качества управления вплоть до неустойчивости из-за того, что каждый контур управления может создавать возмущения для других контуров. Введение же типовых обратных связей в "перекрестных" каналах приводит к резкому усложнению задачи настройки параметров многомерного регулятора [1]. В результате, судя по данным обследования фирмы Honeywell, лишь треть контуров промышленных систем управления работает с нормальными настройками, остальные — с ослабленными настройками или практически разомкнутыми обратными связями [2]. Представлен-

ные в работе методы нацелены на то, чтобы дать современному инженеру понятные и вместе с тем достаточно универсальные инструменты для управления процессами, которые характеризуются перекрестными связями ряда показателей и запаздывающей реакцией на управляющие воздействия.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу настройки многомерного регулятора, предназначенного для стабилизации многосвязного объекта с l выходными переменными и $m \leq l$ управляющими воздействиями. Полагая, что каждое управляющее воздействие оказывает влияние на каждую выходную переменную, будем рассматривать линейную динамическую модель объекта управления

$$y_i = \sum_{j=1}^m h_{ij}(p)u_j + n_i, \quad i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Смысл задачи управления состоит в поддержании выходных переменных $y_i(t)$ на заданных уровнях y_i^* в условиях неконтролируемых возмущающих воздействий $n_i(t)$. Будем также считать, что каждое управляющее воздействие формируется с учетом отклонений от задания каждой из выходных переменных по правилу

$$u_j = \sum_{i=1}^l w_{ji}(p)(y_i^* - y_i), \quad i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Тогда уравнения системы "объект — регулятор", записанные в векторно-матричной форме, приобретут вид

$$y = \mathbf{H}(p)\mathbf{u} + \mathbf{n}, \quad \mathbf{u} = \mathbf{W}(p)(\mathbf{y}^* - \mathbf{y}), \quad (3)$$

что соответствует схеме, приведенной на рис. 1.

Далее конкретизируем задачу, приняв, что динамика по каналам передачи управляющих воздействий описывается наиболее распространенной в промышленной автоматике моделью с запаздыванием

$$\mathbf{H}(p) = [h_{ij}(p)], \quad h_{ij}(p) = \tilde{h}_{ij}(p)e^{-p\tau_{ij}}, \quad i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

где $\tilde{h}_{ij}(p)$ и τ_{ij} — соответственно устойчивые передаточные функции и значения, определяющие динамическую модель управляемого процесса.

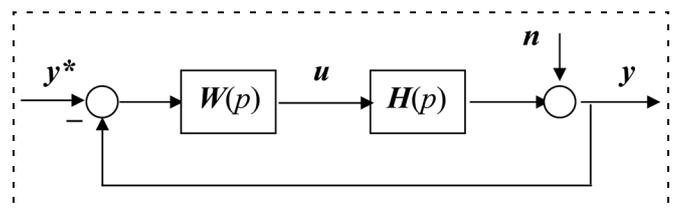


Рис. 1. Блок-схема системы управления

Будем полагать, что для управления по отклонению используются ПИД-регуляторы

$$\mathbf{W}(p) = [w_{ji}(p)], w_{ji}(p) = a_{ji} + b_{ji}/p + c_{ji}p, \\ i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

и задача состоит в настройке их параметров a_{ji} , b_{ji} , c_{ji} . Если же интересует применение ПИ-регуляторов, то настройке подлежат параметры a_{ji} и b_{ji} , а параметры c_{ji} полагаются равными нулю. Заметим, что передаточная матрица многомерного типового регулятора может быть представлена в виде

$$\mathbf{W}(p) = \mathbf{A} + \mathbf{B}/p + \mathbf{C}p, \quad (6)$$

где $\mathbf{A} = [a_{ji}]$, $\mathbf{B} = [b_{ji}]$, $\mathbf{C} = [c_{ji}]$ — матрицы фигурирующих в (5) параметров П-, И- и Д-составляющих, причем для ПИ-регулятора $\mathbf{C} = 0$.

Комбинированный метод настройки типовых регуляторов для объектов с квадратной передаточной матрицей. Вначале рассмотрим наиболее важный в практическом отношении вариант, когда число управляющих воздействий равно числу стабилизируемых показателей, т. е. $m = l$. В [3] был предложен так называемый комбинированный метод настройки параметров многомерных типовых регуляторов. Суть метода состоит в том, что вектор управляющих воздействий формируется в каждый момент времени в виде линейной комбинации двух составляющих, каждая из которых представляет собой выход "порождающего" (т. е. соответствующего в той или иной мере упрощенной структуре объекта) многомерного типового регулятора. Подобная комбинированная структура позволяет сочетать быстроту реакции автономного по каналам управления регулятора первого типа с возможностью учета перекрестных связей более "осторожным" регулятором второго типа.

В соответствии с [3] сформируем закон управления в виде

$$\mathbf{W}(p) = \rho \mathbf{W}^{(1)}(p) + (1 - \rho) \mathbf{W}^{(2)}(p), \quad (7)$$

где $\mathbf{W}^{(1)}(p)$ и $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ — передаточные матрицы вспомогательных типовых регуляторов, имеющие ту же структуру, что и передаточная матрица (5), а ρ — подлежащий выбору весовой коэффициент, причем $\rho \in [0, 1]$.

Диагональная передаточная матрица $\mathbf{W}^{(1)}(p)$ призвана стабилизировать объект $\mathbf{H}^{(1)}(p)$, полученный из исходного пренебрежением перекрестными связями. Она составляется из передаточных функций автономных типовых регуляторов, причем их параметры могут быть, вообще говоря, определены по любой из известных схем расчета автономно работающих одномерных регуляторов [4–7].

Передаточная матрица $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ предназначена для стабилизации объекта, имеющего ту же матри-

цу статических коэффициентов усиления, что исходный объект (4), но единую динамику по всем каналам управления, т. е.

$$\mathbf{H}^{(2)}(p) = \mathbf{H}(0) \tilde{h}^{(2)}(p) e^{-p\tau^{(2)}}. \quad (8)$$

Запаздывание в (8) определяется по правилу

$$\tau^{(2)} = \max_{i,j} \{\tau_{ij}\}, i, j = \overline{1, l}. \quad (9)$$

Обозначим $T_{ij}^{\text{пер}}$ длительность переходного процесса $y_i(t)$ при подаче ступенчатого управляющего воздействия u_j . Выберем такую пару (\tilde{i}, \tilde{j}) , для которой

$$T_{\tilde{i}\tilde{j}}^{\text{пер}} = \min_{i,j} \{T_{ij}^{\text{пер}}\}, i, j = \overline{1, l}. \quad (10)$$

Тогда

$$\tilde{h}^{(2)}(p) = \tilde{h}_{\tilde{i}\tilde{j}}(p) / \tilde{h}_{\tilde{i}\tilde{j}}(0). \quad (11)$$

Формирование динамических характеристик вспомогательного объекта (8) по правилам (9)–(11) способствует (в духе робастного управления) повышению "осторожности" при формировании управляющих воздействий, так как объекты с большим запаздыванием и малой инерционностью требуют для стабилизации "слабых" настроек регуляторов.

Расчет параметров многомерного типового регулятора $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ для объекта $\mathbf{H}^{(2)}(p)$ по методу динамической компенсации приводит к соотношениям

$$\mathbf{W}^{(2)}(p) = [\mathbf{H}(0)]^{-1} (a^{(2)} + b^{(2)}/p + c^{(2)}p), \quad (12)$$

где скалярные параметры $a^{(2)}$, $b^{(2)}$, $c^{(2)}$ для ПИД-регулятора или параметры $a^{(2)}$, $b^{(2)}$ для ПИ-регулятора могут быть определены по любой из известных методик расчета типовых регуляторов применительно к одномерному объекту с единичным коэффициентом усиления $\tilde{h}^{(2)}(p) e^{-p\tau^{(2)}} [4–7]$.

Конкретизируем намеченную схему расчета вспомогательных типовых регуляторов применительно к наиболее употребительной динамической модели инерционного звена с запаздыванием. В этом случае в (4)

$$\tilde{h}_{ij}(p) = \frac{K_{ij}}{T_{ij}p + 1}, i = \overline{1, l}, j = \overline{1, m},$$

и для расчета одномерных типовых регуляторов предлагается использовать рассмотренный в [3] компенсационный метод. Данный метод базируется на том, что параметры регулятора выбираются из условия соответствия передаточной функции замкнутой системы управления заданному эталонному образцу. Таким образом является безынерционный объект с единичным коэффициентом усиления

ния и единичным чистым запаздыванием, управляемый оптимально настроенным регулятором соответствующего типа. При настройке ПИ-регулятора для эталонной системы следует рассмотреть И-регулятор, а при настройке ПИД-регулятора для эталонной системы рассматривается ПИ-регулятор. Например, если в качестве показателя качества управления использовать интегральный квадратичный критерий (ИКК), то следуя изложенной в [3] методике, следует принять

$$\mathbf{W}^{(1)}(p) = \text{diag}\{w_{11}^{(1)}(p), \dots, w_{nn}^{(1)}(p)\},$$

где $w_{ii}^{(1)}(p) = a_{ii}^{(1)} + b_{ii}^{(1)}/p + c_{ii}^{(1)}p$, (13)

причем параметры автономных регуляторов определяются по формулам

$$a_{ii}^{(1)} = 0,739 \frac{T_{ii}}{k_{ii}\tau_{ii}}, \quad b_{ii}^{(1)} = 0,739 \frac{1}{k_{ii}\tau_{ii}}, \quad c_{ii}^{(1)} = 0 \quad (14)$$

или

$$a_{ii}^{(1)} = \frac{1}{k_{ii}} \left(0,453 + 0,796 \frac{T_{ii}}{\tau_{ii}} \right),$$

$$b_{ii}^{(1)} = 0,796 \frac{1}{k_{ii}\tau_{ii}}, \quad c_{ii}^{(1)} = 0,453 \frac{T_{ii}}{k_{ii}}$$

для ПИ и ПИД-регуляторов соответственно.

Как уже говорилось, передаточная матрица $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ формируется для регулирования объекта, имеющего ту же матрицу статических коэффициентов усиления, что исходный объект (8), но единую динамику по всем каналам управления, т. е.

$$\mathbf{H}^{(2)}(p) = \mathbf{H}(0) \frac{1}{T^{(2)}p + 1} e^{-p\tau^{(2)}}. \quad (15)$$

Динамические показатели в (15) определяются по правилу

$$T^{(2)} = \min_{i,j} \{T_{ij}\}, \quad \tau^{(2)} = \max_{i,j} \{\tau_{ij}\}, \quad i, j = \overline{1, l}, \quad (16)$$

а параметры регулятора (12) рассчитываются по формулам

$$a^{(2)} = 0,739 \frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}}, \quad b^{(2)} = 0,739 \frac{1}{\tau^{(2)}}, \quad c^{(2)} = 0 \quad (17)$$

или

$$a^{(2)} = 0,453 + 0,796 \frac{T^{(2)}}{\tau^{(2)}}, \quad b^{(2)} = 0,796 \frac{1}{\tau^{(2)}},$$

$$c^{(2)} = 0,453 T^{(2)}$$

для ПИ и ПИД-регуляторов соответственно.

Выбор $T^{(2)}$ и $\tau^{(2)}$ по правилу (16) соответствует минимизации коэффициентов усиления регулятора $a^{(2)}$, $b^{(2)}$ и $c^{(2)}$, что, в свою очередь, ведет к повышению "осторожности" при формировании управляющих воздействий.

Расчет весового коэффициента ρ в комбинированном регуляторе (7) может быть выполнен с использованием так называемой матрицы Бристоля [6]

$$\lambda = [\lambda_{ij}], \quad \text{где } \lambda_{ij} = [\mathbf{H}(0)]_{ij} [(\mathbf{H}(0)^T)^{-1}]_{ij}, \quad (18)$$

которая характеризует степень связности многомерного объекта. Руководствуясь тем, что данная матрица имеет тем большую диагональную доминантность, чем меньше влияние перекрестных связей, можно принять для расчета ρ следующее правило [3]:

$$\rho = \|\lambda_{diag}\| / \|\lambda\|, \quad \text{где } \lambda_{diag} = \text{diag}\{\lambda_{11}, \dots, \lambda_{ll}\},$$

$$\|\lambda_{diag}\| = \sum_{i=1}^l |\lambda_{ii}|, \quad \|\lambda\| = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l |\lambda_{ij}|. \quad (19)$$

В соответствии с этим правилом доля автономного регулятора $\mathbf{W}^{(1)}(p)$ во взвешенной сумме (7) тем выше, чем слабее перекрестные связи в объекте управления.

Рассчитав по предлагаемой схеме параметры вспомогательных регуляторов $\mathbf{W}^{(1)}(p)$ и $\mathbf{W}^{(2)}(p)$, а также весовой коэффициент ρ , можно полностью аналитическим способом найти все настройки многомерного типового регулятора (5) для управления исходным многосвязным объектом (4).

К сожалению, подобный привлекательный подход не всегда обеспечивает наилучшие результаты. Альтернативный способ состоит в численной оптимизации параметров многомерного регулятора в рамках рассмотренной комбинированной структуры (7). Такую оптимизацию удобнее всего проводить путем имитационного моделирования замкнутой системы управления с применением какого-либо из известных пакетов прикладных программ [8]. Наряду с полностью аналитической процедурой настройки (А-метод) рассматривались частично-аналитическая процедура (ЧА-метод) и поисковая процедура (П-метод). Две последние активно используют имитационное моделирование. ЧА-метод предусматривает аналитическое определение параметров настройки двух вспомогательных регуляторов, а затем поиск в процессе имитации оптимального значения взвешивающего коэффициента ρ . П-метод предполагает поиск в процессе имитации как оптимальных значений настраиваемых параметров вспомогательных регуляторов, так и весового коэффициента ρ .

Важно подчеркнуть, что предложенная структура многомерного регулятора исключает необходимость одновременного поиска большого числа настраиваемых

мых параметров. Например, оптимизация вспомогательного многомерного ПИД-регулятора $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ требует поиска лишь трех параметров a , b и c независимо от размерности объекта управления. Численная оптимизация весового коэффициента ρ сводится к простейшей задаче одномерного поиска. Другим важным обстоятельством является тот факт, что, используя П-метод настройки, рациональным выбором перечисленных здесь параметров всегда можно обеспечить устойчивость замкнутой системы управления. Это следует из общих результатов работы [9].

Направление, связанное с имитацией, является, по-видимому, главным, так как имитационное моделирование позволяет максимально приблизить модель управляемого процесса к реальности, учесть всевозможные ограничения, исследовать чувствительность системы к неизбежным неточностям математического описания. В ходе машинной имитации работы замкнутой системы используются различные настройки регуляторов, причем средствами тех же пакетов моделирования численно оцениваются показатели качества управления, например, интегральный квадратичный критерий (ИКК). Наилучшие по выбранному критерию настройки находятся одним из численных методов поиска — вся процедура оптимизации настроек может быть полностью автоматизирована. Одним из удобных инструментов для этого служит, например, пакет прикладных программ Matlab-Simulink. Удобные средства мониторинга в виде графиков изменения переменных во времени позволяют разработчику визуально оценивать ход моделирования и вносить коррективы.

Говоря об оптимизации тех или иных параметров рассматриваемых алгоритмов управления с применением машинной имитации работы замкнутой системы, необходимо обратить внимание на способы моделирования возмущений. Если моделируются случайные возмущения, то используются датчики стандартного белого шума и последовательно с ними устанавливаются формирующие фильтры, соответствующие характеру возмущений на конкретном объекте. Часто, однако, достаточно полная информация о возмущениях отсутствует. В этом распространенном варианте имеет смысл рассчитывать на худшее, т. е. настраивать регулятор на отработку наибольших по модулю ступенчатых возмущающих воздействий. Следуя минимаксному подходу, необходимо для каждой комбинации возможных значений настраиваемых параметров регулятора выполнить серию модельных экспериментов со всевозможными сочетаниями знаков ступенчатых возмущений и определить наиболее неблагоприятный вариант (например, соответ-

ствующий наибольшему значению ИКК). Перебирая таким образом различные комбинации настроек, следует найти ту из них, которая обеспечивает при наихудшем сочетании возмущений наилучшее качество управления (например, наименьшее значение ИКК).

Возвращаясь к рассмотренным выше аналитическим способам настройки многомерных регуляторов, следует отметить, что они могут служить для формирования начальных приближений при численной оптимизации, что ускоряет сходимость поисковых процедур.

Настройка типовых регуляторов при управлении объектом с прямоугольной передаточной матрицей.

В ряде практически важных ситуаций (см., например, [10]) число управляющих воздействий меньше числа нуждающихся в регулировании показателей технологического процесса, т. е. имеет место соотношение $m < l$. В этом варианте обычный способ введения связей от каждой из регулируемых выходных переменных к соответствующему управляющему воздействию принципиально неприемлем в силу отсутствия количественного соответствия между управляемыми и управляющими переменными. В силу указанного обстоятельства при конструировании системы (1)–(5) приходится отказаться от комбинированной структуры (7), ограничившись лишь той ее частью, которая учитывает перекрестные связи между переменными в статике.

Рассмотрим задачу стабилизации статического объекта с передаточной матрицей $\mathbf{H}(0)$, полученного из исходного объекта (4) при упрощающих допущениях об отсутствии инерционности и запаздываний в управляемом процессе. В силу прямоугольного вида передаточной матрицы объекта при действии возмущений \mathbf{n} , вообще говоря, невозможно стабилизировать объект на заданном уровне \mathbf{y}^* , а можно лишь добиваться минимизации разницы между заданием и установившимся значением вектора выходных переменных \mathbf{y} .

Если в качестве цели управления принять минимизацию квадратичной формы

$$J = (\mathbf{y} - \mathbf{y}^*)^T \mathbf{Q} (\mathbf{y} - \mathbf{y}^*) \quad (20)$$

с положительно определенной весовой матрицей \mathbf{Q} , то с использованием градиентной процедуры в модификации Ньютона придем к многомерному И-регулятору, определяемому матричной передаточной функцией [11]

$$\mathbf{W}(p) = [\mathbf{H}^T(0)\mathbf{Q}\mathbf{H}(0)]^{-1}\mathbf{H}^T(0)\mathbf{Q}b/p.$$

Из результатов работы [9] следует, что при достаточно малых значениях $b > 0$ сходимость к заданию \mathbf{y}^* в смысле критерия (20) сохраняется и для исходного динамического объекта (4). При этом

параметр b может подбираться путем имитационного моделирования замкнутой системы исходя из тех или иных требований к переходному процессу.

Обобщение рассмотренного способа формирования регулятора может быть получено в виде многомерного ПИД-регулятора

$$\mathbf{W}(p) = [\mathbf{H}^T(0)\mathbf{Q}\mathbf{H}(0)]^{-1}\mathbf{H}^T(0)\mathbf{Q}(a + b/p + cp),$$

где все три коэффициента скалярной части ПИД-регулятора определяются поисковым путем в процессе имитационного моделирования. Начальным приближением могут служить настройки a , b и c , полученные аналитически теми же способами, что использовались при настройке вспомогательного регулятора $\mathbf{W}^{(2)}(p)$ для объекта с квадратной передаточной матрицей.

Учет ограничений на управляющие воздействия [12]. Для большинства объектов промышленной автоматизации характерны явления инерционности и запаздывания. Преодоление значительной инерционности при компенсации действующих на объект возмущений требует сильных управляющих воздействий, которые могут выходить за допустимые границы. Вместе с тем, большинство существующих методик расчета параметров законов регулирования с обратной связью не учитывают допуски на величину управляющих воздействий. Рассмотрим простой метод расчета коэффициентов распространенных в промышленности "реальных" ПИД-регуляторов

$$W(p) = a + b/p + cp/(T_d p + 1),$$

учитывающий ограничения на управления и обеспечивающий приемлемое качество отработки возмущений. Здесь в дифференциальной части добавлено инерционное звено с малой постоянной времени T_d , которое "сглаживает" начальный дельта-импульс при подаче на выход замкнутой системы управления наиболее сложного для отработки ступенчатого возмущения.

Пусть регулятор используется для стабилизации устойчивого объекта с запаздыванием τ . В основу предлагаемого метода положено подтверждаемое моделированием допущение, что под действием ступенчатого возмущающего сигнала N модуль управляющего воздействия на начальном интервале $0 \leq t \leq \tau$ достигает близкого к максимуму значения за все время переходного процесса. Поскольку при $y^* = 0$ для $0 \leq t \leq \tau$

$$u(t) = -\left(a + bt + \frac{c}{T_d} e^{-\frac{t}{T_d}}\right) N \quad (21)$$

и при достаточно малом T_d определяемая зависимостью (21) функция $|u(t)|$ имеет максимумы при $t = 0$ и $t = \tau$, то ограничение на управляющее воздействие $|u(t)| \leq U$ запишется в виде системы двух неравенств

$$\left|a + \frac{c}{T_d}\right| \leq U/N^{\max}, \quad \left|a + b\tau + \frac{c}{T_d} e^{-\frac{\tau}{T_d}}\right| \leq U/N^{\max}, \quad (22)$$

где N^{\max} — максимально возможное значение возмущающего воздействия $n(t)$.

Ограничения (22) должны учитываться при оптимизации параметров ПИД-регулятора с учетом допусков на управляющие воздействия (если речь идет о настройке ПИ-регулятора, то существенно лишь второе из ограничений (22) при $c = 0$).

Пусть в отсутствие учета ограничений на управления аналитически или поисковым путем с использованием имитационного моделирования найдены оптимальные настройки a^* , b^* и c^* . Тогда можно поставить задачу максимального приближения к этим настройкам при соблюдении ограничений (22), которая может быть формализована в виде минимизации квадратичной функции

$$J = (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2 + (c - c^*)^2 \quad (23)$$

(при учете ограничений для ПИ-регулятора в (23) следует учитывать лишь первые два слагаемых). Аналитическое решение сформулированной задачи квадратичного программирования для инерционного объекта с запаздыванием приведено в [12].

Подобным же способом ограничения на управления учитываются и в многомерном варианте [13]. Например, применительно к объекту с квадратной передаточной матрицей и ПИД-регулятору настройки вспомогательного регулятора $\mathbf{W}^{(1)}(p)$ находятся в результате решения m задач квадратичного программирования

$$J = (a_{ii}^{(1)} - a_{ii}^{*(1)})^2 + (b_{ii}^{(1)} - b_{ii}^{*(1)})^2 + (c_{ii}^{(1)} - c_{ii}^{*(1)})^2 \rightarrow \min; \quad (24)$$

$$\left|a_{ii}^{(1)} + \frac{c_{ii}^{(1)}}{T_d}\right| \leq \frac{U_i}{N_i^{\max}};$$

$$\left|a_{ii}^{(1)} + b_{ii}^{(1)} \tau_{ii} + \frac{c_{ii}^{(1)}}{T_d} e^{-\frac{\tau_{ii}}{T_d}}\right| \leq \frac{U_i}{N_i^{\max}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (25)$$

а настройки вспомогательного регулятора

$$\mathbf{W}^{(2)}(p) = \mathbf{B}[a^{(2)} + b^{(2)}/p + c^{(2)}p/(T_d p + 1)],$$

где $\mathbf{B} = [\mathbf{H}(0)]^{-1}$, (26)

определяются в результате решения задачи квадратичного программирования

$$J = (a^{(2)} - a^{*(2)})^2 + (b^{(2)} - b^{*(2)})^2 + (c^{(2)} - c^{*(2)})^2 \rightarrow \min; \quad (27)$$

$$a^{(2)} + c^{(2)}/T_d \leq f;$$

$$a^{(2)} + b^{(2)}\tau^{(2)} + \frac{c^{(2)}}{T_d} e^{-\frac{\tau^{(2)}}{T_d}} \leq f. \quad (28)$$

Здесь введены обозначения

$$f = \min\{f_i\}, f_i = \frac{U_i}{\sum_{j=1}^m |b_{ij}| N_j^{\max}}, i = \overline{1, m}, \quad (29)$$

где b_{ij} — элементы фигурирующей в (26) матрицы \mathbf{B} .

Для учета допусков на управления при настройке многомерного ПИ-регулятора во всех приведенных задачах квадратичного программирования следует обнулить коэффициенты c и рассматривать лишь второе ограничение.

Пример 1. Рассмотрим задачу управления процессом отделения метанола от воды в дистилляционной колонне. Этот процесс был проанализирован в монографии [6], где для его описания в отклонениях от расчетного режима использовалась динамическая модель с передаточной матрицей

$$\mathbf{H}(p) = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-p}}{16,7p+1} & \frac{-18,9e^{-3p}}{21,0p+1} \\ \frac{6,6e^{-7p}}{10,9p+1} & \frac{-19,4e^{-3p}}{14,4p+1} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

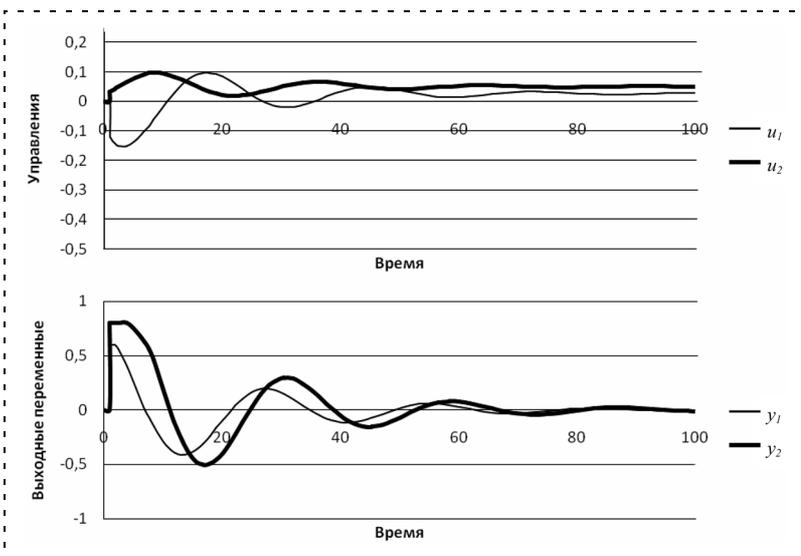


Рис. 2. Э-метод настройки; реакция системы на ступенчатые возмущения

Выходными переменными, которые необходимо поддерживать на заданном уровне, являются y_1 и y_2 — молярные концентрации метанола в дистилляте и остатке. Управляющие воздействия u_1 и u_2 — верхний рециркуляционный поток и поток пара на входе в подогреватель. Максимальные приведенные к выходу возмущения составляют $N_1^{\max} = 0,6$ и $N_2^{\max} = 0,8$. Применительно к данному объекту в [6] приведены экспериментально найденные настройки двух автономных ПИ-регуляторов $\mathbf{W}(p) = \text{diag}\{w_{11}(p), w_{22}(p)\}$, где $w_{11}(p) = 0,2 + 0,045/p$, $w_{22}(p) = -0,04 - 0,015/p$. Переходные процессы, соответствующие данному способу управления (назовем его Э-методом), приведены на рис. 2.

Применим для управления тем же объектом ПИ-регулятор, рассчитанный по комбинированной схеме, в трех обсуждавшихся ранее модификациях (А-, ЧА-и П-методы). Начав с А-метода, в соответствии с (13), (14) рассчитаем параметры двух автономных ПИ-регуляторов $a_{11}^{(1)}, b_{11}^{(1)}, a_{22}^{(1)}, b_{22}^{(1)}$, необходимые для формирования первого вспомогательного регулятора $\mathbf{W}^{(1)}(p)$. Затем для сформированного по формулам (15), (16) вспомогательно-го объекта

$$\mathbf{H}^{(2)}(p) = \begin{bmatrix} 12,8 & -18,9 \\ 6,6 & -19,4 \end{bmatrix} \frac{1}{10,9p+1} e^{-7p}$$

в соответствии с (12), (17) определим параметры второго вспомогательного регулятора $\mathbf{W}^{(2)}(p)$. Далее необходимо рассчитать весовой коэффициент ρ для формирования комбинированного регулятора (7). В соответствии с (18) для двусвязного объекта матрица Бристоля, характеризующая интенсивность перекрестных связей, имеет вид

$$\lambda = \begin{bmatrix} k_{11}k_{22} & -k_{21}k_{12} \\ -k_{21}k_{12} & k_{11}k_{22} \end{bmatrix} / (k_{11}k_{22} - k_{21}k_{12}) = \begin{bmatrix} 2,0094 & -1,0094 \\ -1,0094 & 2,0094 \end{bmatrix}.$$

Отсюда вычисленный по формуле (19) весовой коэффициент примет значение $\rho = 0,66$. Рассчитав таким образом все параметры двух вспомогательных регуляторов и взвешивающий коэффициент ρ , можно в соответствии с (7) найти все параметры матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} двумерного ПИ-регулятора (6). Результаты расчетов приведены в таблице.

Сравнительные показатели методов настройки параметров регуляторов

Параметры	Методы настройки			
	Аналитический	Частично-аналитический	Поисковый	Экспериментальный
A	$\begin{bmatrix} 0,70 & -0,05 \\ 0,02 & -0,04 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,047 & -0,11 \\ 0,04 & -0,14 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,45 & -0,17 \\ 0,06 & -0,17 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & -0,04 \end{bmatrix}$
B	$\begin{bmatrix} 0,044 & -0,005 \\ 0,002 & -0,012 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,032 & -0,003 \\ 0,003 & -0,012 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,029 & -0,018 \\ 0,006 & -0,015 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,045 & 0 \\ 0 & -0,015 \end{bmatrix}$
ρ	0,66	0,38	0,27	—
ИКК	0,056	0,047	0,046	0,092
Время стабилизации, мин	62	40	26	78
Время расчета, с	0,03	3	725	—

Там же приведены значения двух показателей качества управления: интегрального квадратичного критерия (ИКК)

$$J = \frac{1}{T^{\text{мод}}} \int_0^{T^{\text{мод}}} [(y_1^* - y_1)^2 + (y_2^* - y_2)^2] dt,$$

где $T^{\text{мод}}$ — время моделирования, и времени стабилизации, рассчитываемого как время попадания обеих выходных переменных в 5 %-ную трубку от установившихся значений. В той же таблице приведены аналогичные характеристики настроек, полученных с использованием имитационного моделирования и параметрической оптимизации в соответствии с ЧА-, П- и Э-методами.

Данные таблицы дополняются рис. 2—5, где приведены графики переходных процессов для всех рассмотренных методов настройки параметров регуляторов.

Необходимо обратить внимание на то, что результаты расчетов и графики соответствуют самым "тяжелым" для компенсации сочетаниям знаков предельных по величине возмущений, и, как видно из графиков, эти сочетания оказываются разными для разных методов настройки.

Сравнивая данные таблицы и графики, можно убедиться в преимуществе всех предлагаемых в статье методов над Э-методом как по ИКК, так и по длительности переходных процессов. Что касается сравнения между собой трех рассмотренных модификаций комбинированного метода настройки, то худшие показатели обеспечивает наиболее простой для расчетов А-метод, а лучшие — П-метод.

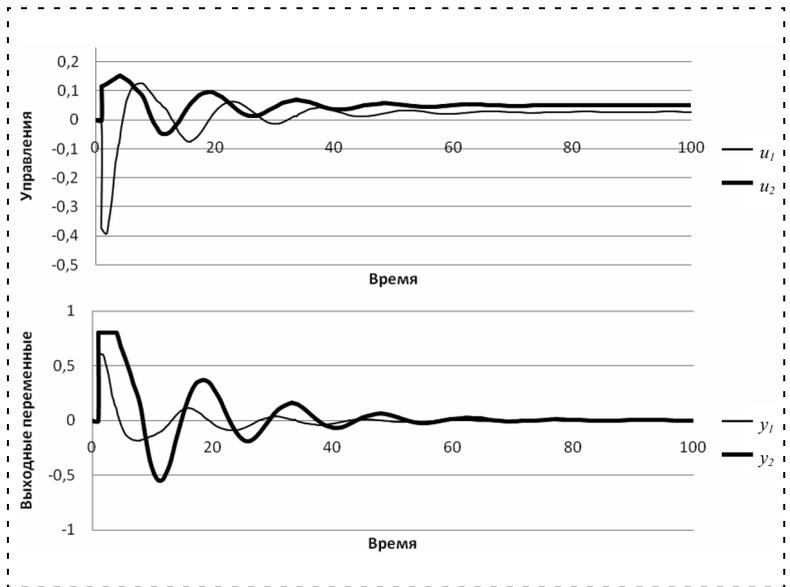


Рис. 3. А-метод настройки; реакция системы на ступенчатые возмущения

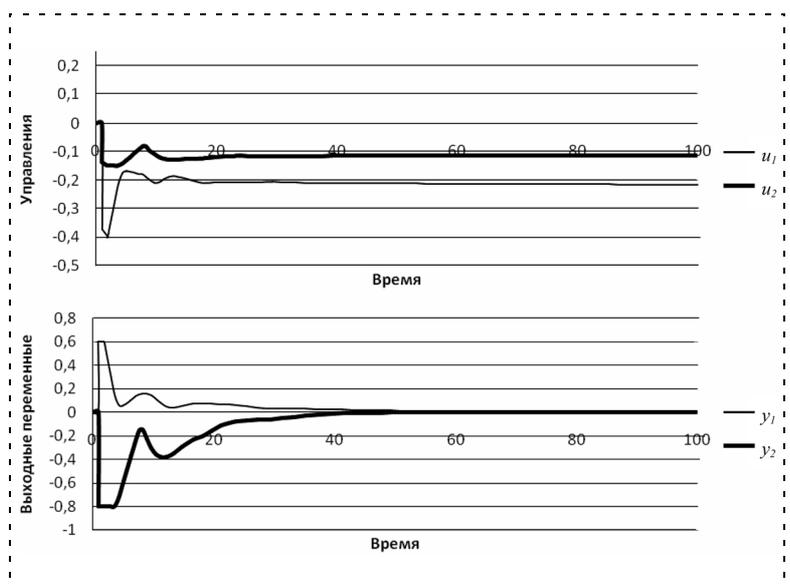


Рис. 4. ЧА-метод настройки; реакция системы на ступенчатые возмущения

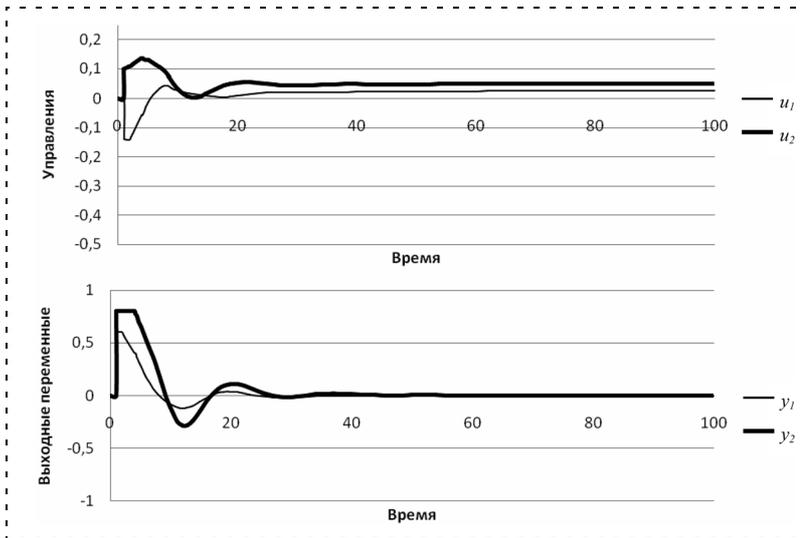


Рис. 5. П-метод настройки; реакция системы на ступенчатые возмущения

В таблице указано также время расчета настроек регуляторов. Видно, что при использовании аналитического метода расчет выполняется практически мгновенно в то время, как наиболее "времяемкий" П-метод затратил на расчет восьми параметров регуляторов (элементы матриц **A** и **B**) порядка 12 мин. Для сравнения следует отметить, что когда, отказавшись от комбинированной схемы настройки, оптимизацию тех же восьми параметров по ИКК осуществили "в лоб" одним из методов направленного перебора, то на том же компьютере было затрачено порядка 1,3 ч, причем полученная замкнутая система управления оказалась неустойчивой.

Важным показателем практической пригодности регуляторов является чувствительность качества управления к неточностям моделей управляемого объекта, которые были использованы при настройке этих регуляторов. Имитационное исследование чувствительности применительно к рассматриваемому примеру проводилось в двух направлениях, а именно: проверялась чувствительность к расстройкам моделей по *отдельным* параметрам k_{ij} , T_{ij} , τ_{ij} , а также — к расстройкам по *совокупности* тех же параметров. И в том, и в другом случаях все параметры моделей изменялись по сравнению с расчетными на 10 % и на 20 %. Чувствительность характеризовалась показателем δ — максимальным относительным увеличением ИКК вследствие расстройек модели. При моделировании фиксировались также случаи потери устойчивости.

Чувствительность проверялась для ЧА-метода настройки. В первом варианте (расстройка по отдельным параметрам модели) было выполнено по 24 имитационных эксперимента для 10 %-й и 20 %-й расстройек. По результатам исследования устойчивость

сохраняется во всех случаях, а показатель чувствительности δ не превосходит соответственно 16 % и 46 %. Во втором варианте (всевозможные расстройек по совокупности параметров модели) было выполнено по $2^{12} = 4096$ имитационных экспериментов для 10 %-й и 20 %-й расстройек. При этом для 10 %-й неточности моделей экстремальное значение показателя чувствительности δ достигает 194 %, т. е. оцениваемое по ИКК качество управления в наихудшем варианте снижается практически втрое. Вместе с тем, устойчивость сохраняется во всех случаях, и относительные потери качества управления δ превышают 50 % только для 341 объекта из 4096, что составляет меньше 10 %. Для 20 %-й неточности моделей относительные потери качества управления δ превышают 50 % уже у 1325 объектов из 4096, и в ряде случаев имеет место потеря устойчивости. Моделирование показало, что наибольшая чувствительность проявляется при расстройках по коэффициентам усиления k_{ij} .

Аналогичное исследование чувствительности было выполнено также применительно к Э-методу настройки регуляторов. Оно показало примерно те же результаты, что и для ЧА-метода.

В целом, по результатам моделирования можно сделать вывод, что, не уступая Э-методу по показателю чувствительности к ошибкам модели объекта управления, комбинированная схема настройки типовых регуляторов во всех ее модификациях обеспечивает существенно более высокое качество управления.

Пример 2. Рассмотрим ту же задачу управления процессом отделения метанола от воды в дистилляционной колонне, но учтем ограничения на управляющие воздействия $|u_j(t)| \leq U_j$, приняв $U_1 = 0,3$ и $U_2 = 0,2$.

Продемонстрируем аналитический способ учета ограничений при расчете настроек четырех ПИ-регуляторов в прямых и перекрестных каналах управления двумерным объектом (30) с помощью А-метода.

Прежде всего, заметим, что судя по графикам на рис. 3, учет ограничений при расчете настроек необходим, так как кривая $u_1(t)$ "залезает" в запретную область. Учет допусков на управления осуществляется при формировании вспомогательных ПИ-регуляторов $W^{(1)}(p)$ и $W^{(2)}(p)$ по схеме (24)—(29). При этом приходим к регулятору

$$W(p) = A + B/p$$

с матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,36 & -0,04 \\ 0,02 & -0,15 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0,023 & -0,004 \\ 0,001 & -0,011 \end{bmatrix}.$$

Переходные процессы при использовании такого регулятора приведены на рис. 6. Они соответствуют кривым u_{c1} и u_{c2} и кривым y_{c1} и y_{c2} . Там же для сравнения приведены аналогичные кривые переходных процессов u_1 , u_2 , y_1 , y_2 , соответствующие настройкам по А-методу без учета ограничений (см. также рис. 3) и сами ограничения u_{c1} и u_{c2} . Из графиков видно, что предложенная расчетная схема позволила "загнать" управления в допустимую область, обеспечив вместе с тем стабилизацию выходных переменных в условиях возмущений.

Заключение. Предложенные методы расчета параметров типовых регуляторов для многомерных динамических систем с запаздыванием позволяют приближенно оптимизировать качество управления с учетом перекрестных связей и ограничений на величину управляющих воздействий при различных соотношениях числа управляющих и стабилизируемых переменных. Имитационное моделирование, являющееся органической составной частью предлагаемой методики, позволяет максимально приблизить модель управляемого процесса к реальности, учесть всевозможные ограничения, исследовать чувствительность системы к неизбежным неточностям математического описания. Благодаря простоте реализации рассмотренные способы можно рекомендовать для настройки типовых регуляторов, используемых в системах многосвязного управления.

Список литературы

1. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Автоматика и телемеханика. 2005. № 5. С. 7–46.
2. Штейнберг Ш. Е., Сережин Л. П. и др. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 7. С. 1–7.

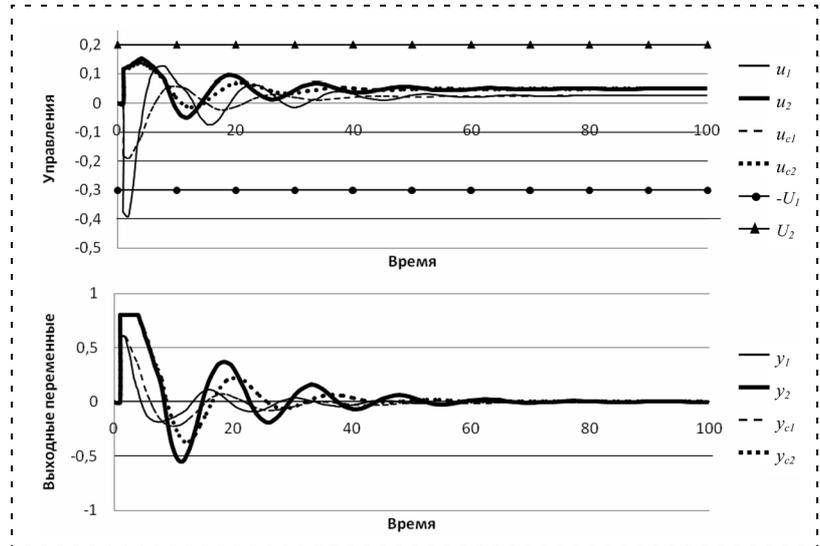


Рис. 6. А-метод настройки с учетом и без учета ограничений на управления; реакция системы на ступенчатые возмущения

3. Яковис Л. М. Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6. С. 51–56.
4. Ротач В. Я. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.
5. Турецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
6. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 368 с.
7. Загарий Г. И., Шубладзе А. М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. М.: Энергоатомиздат, 1988. 104 с.
8. Яковис Л. М. Имитационное моделирование — ключ к решению задач управления сложными технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. 2006. № 7. С. 25–30.
9. Маркечко М. И., Рыбашов М. В. Оптимизация квазистационарного режима в линейных системах // Автоматика и телемеханика. 1987. № 12. С. 55–65.
10. Яковис Л. М. Многокомпонентные смеси для строительства. Расчетные методы оптимизации состава. Л.: Стройиздат, 1988. 296 с.
11. Катковник В. Я., Первозванский А. А. Методы поиска экстремума и задача синтеза многомерных систем управления // Адаптивные автоматические системы. Сб. статей под ред. Г. А. Медведева. М.: Сов. радио, 1972. С. 17–42.
12. Яковис Л. М., Спорягин К. В. Учет ограничений на управляющие воздействия при расчете типовых регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием // Матер. 2-й науч. конф. "Автоматизация в промышленности". Институт проблем управления. Москва, 2008 (электронная публикация).
13. Спорягин К. В., Яковис Л. М. Учет ограничений на управляющие воздействия при расчете регуляторов для многосвязных инерционных объектов с запаздыванием // XXXVII Неделя науки СПбГПУ. Ч. V. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. С. 80–81.

Г. А. Леонов, чл.-корр. РАН, проф.,
 Санкт-Петербургский
 государственный университет,
Н. В. Кондратьева, канд. физ.-мат. наук, доц.,
 Военно-транспортный университет
 железнодорожных войск,
 leonov@math.spbu.ru
 knat0202@mail.ru

Электромеханические и математические модели синхронных электрических машин

Рассмотрены две электромеханические модели синхронных машин. Для этих моделей получены дифференциальные уравнения с угловыми координатами.

Ключевые слова: синхронная машина, ротор, статор, обмотка возбуждения, демпферная обмотка, устойчивость, вращающееся магнитное поле, явнополюсный ротор.

Введение

Вращающееся магнитное поле, создаваемое переменным током в обмотках статора, является одним из основных элементов синхронных и асинхронных электродвигателей переменного тока [1–8]. Такое поле впервые было получено Н. Теслой и Г. Феррарисом в 1888 г.

Поэтому вполне естественным шагом представляется рассмотрение движения ротора синхронной машины во вращающейся системе координат, связанной с вращающимся магнитным полем, создаваемым токами в обмотках статора. Выводу дифференциальных уравнений движения ротора в такой системе координат посвящена настоящая статья.

Вывод этих уравнений для роторов различного типа оказался весьма простым и естественным.

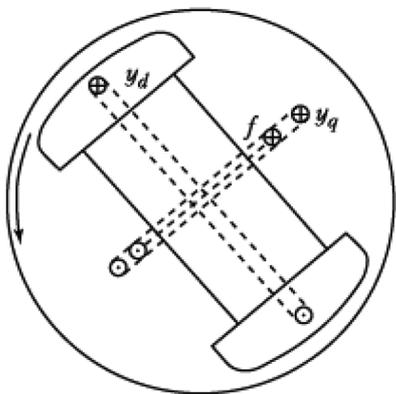


Рис. 1. Т-образный ротор:
f — обмотка возбуждения, *y_q* и *y_d* — демпферные обмотки

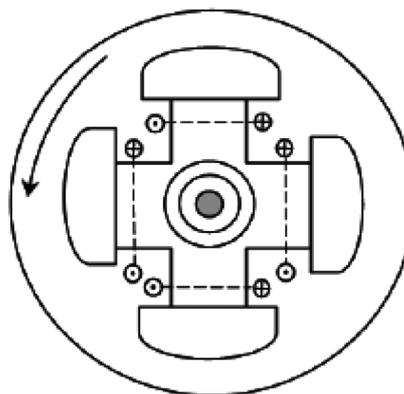


Рис. 2. Явнополюсный ротор (показаны обмотки возбуждения)

При этом для электромеханических моделей Т-образного ротора (рис. 1) такие уравнения совпали с хорошо известными уравнениями, рассмотренными в работах [9, 12–16].

Резко отличны от этих уравнений выведенные здесь дифференциальные уравнения электромеханической модели явнополюсного ротора (рис. 2), которые получены также во вращающейся системе координат. Для такой модели рассмотрены задачи статической устойчивости синхронных машин.

Т-образный ротор

Рассмотрим вначале движение одного витка обмотки во вращающейся системе координат, жестко связанной с вектором напряженности магнитного поля. Предположим, что к витку подводится постоянное напряжение *e*. Ток *i(t)* в обмотке определяется с учетом законов Ома и электромагнитной индукции.

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = e + SB(\sin\theta(t))\dot{\theta}(t). \quad (1)$$

В этом случае уравнение движения ротора с расположенной на нем обмоткой возбуждения относительно вращающегося магнитного поля имеет вид

$$I\ddot{\theta} = -\beta nSBi(t)\sin\theta(t) - M. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) *R* — сопротивление; *L* — индуктивность обмотки; *S* — площадь одного витка обмотки; *n* — число витков обмотки; *B* — напряженность магнитного поля; $\theta(t)$ — угол между плоскостью витка и плоскостью, перпендикулярной к вектору напряженности магнитного поля; *I* — момент инерции ротора; β — коэффициент пропорциональности; *M* — момент внешней нагрузки.

Неособая замена переменных $\theta := -\theta$, $\dot{\theta} = -\eta$, $z = i(t) + \frac{SB}{L} \cos\theta$ приводит систему (1), (2) к системе третьего порядка

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \eta; \\ \dot{\eta} &= a_1 - a_2 z \sin\theta + a_3 \sin\theta \cos\theta; \\ \dot{z} &= a_4 - a_5 z + a_6 \cos\theta, \end{aligned} \quad (3)$$

исследованной в [9] в качестве модели синхронной машины.

$$\begin{aligned} \text{Здесь } a_1 &= \frac{M}{I}, a_2 = \frac{\beta n SB}{I}, a_3 = \frac{\beta n (SB)^2}{IL}, a_4 = \frac{e}{L}, \\ a_5 &= \frac{R}{L}, a_6 = \frac{RBS}{L^2}. \end{aligned}$$

Предположим теперь, что в пазах ротора располагаются две перпендикулярные по отношению друг к другу обмотки. Схематично они показаны на рис. 3. К обмотке возбуждения с током $i_1(t)$ подводится (обычно через щетки электродвигателя) постоянное напряжение e . Демпферная обмотка с током $i_2(t)$ короткозамкнута.

Будем рассматривать по-прежнему движение двух витков обмоток во вращающейся системе координат, жестко связанной с вектором напряженности магнитного поля [10, 11]. Параметры R, L, S обмоток будем считать одинаковыми. В этом случае, если пренебречь взаимной индукцией обмоток, токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$ в этих обмотках определяются формулами:

$$\begin{aligned} L \frac{di_1(t)}{dt} + Ri_1(t) &= e + SB(\sin\theta(t))\dot{\theta}(t); \\ L \frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t) &= SB(\cos\theta(t))\dot{\theta}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

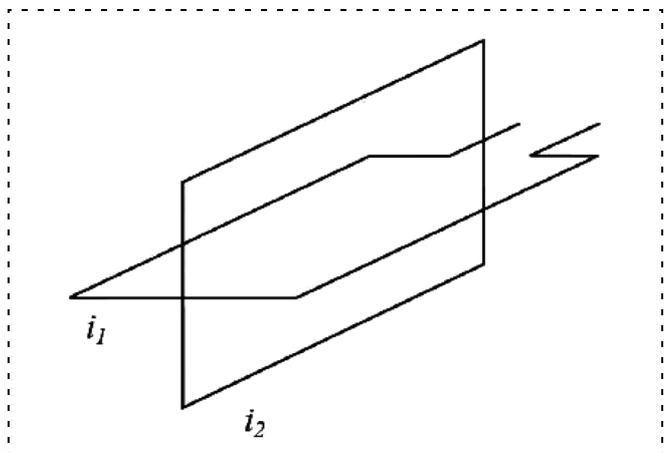


Рис. 3. Схема двух обмоток. Показаны виток обмотки возбуждения с током $i_1(t)$ и виток демпферной обмотки с током $i_2(t)$

Здесь $\theta(t)$ — угол между плоскостью витка обмотки с током $i_1(t)$ и плоскостью, перпендикулярной вектору напряженности магнитного поля.

Уравнение движения ротора с расположенными на нем двумя обмотками относительно вращающегося магнитного поля имеет вид

$$I\ddot{\theta} = -\beta n SB(i_1(t)\sin\theta + i_2(t)\cos\theta) - M. \quad (5)$$

Предположим вначале, что $L = 0$. В этом случае, подставляя (4) в уравнение (5), получим

$$I\ddot{\theta} = -\frac{\beta n S^2 B^2}{R} \dot{\theta} - \frac{\beta n S B e}{R} \sin\theta - M.$$

Введя переобозначение $\theta \rightarrow -\theta$, это уравнение можно записать в виде

$$\ddot{\theta} + k\theta + b\sin\theta = \gamma. \quad (6)$$

Здесь

$$k = \frac{\beta n S^2 B^2}{IR}, b = \frac{\beta n S B e}{IR}, \gamma = \frac{M}{I}.$$

Не умаляя общности, примем, что $b = 1$. К уравнению такого вида можно привести уравнение (6), используя замену времени $\tau = t\sqrt{b}$.

Перейдем от уравнения (6) к эквивалентной системе

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \eta; \\ \dot{\eta} &= -\alpha\eta - \sin\theta + \gamma. \end{aligned} \quad (7)$$

Синхронному рабочему режиму синхронной машины соответствует состояние равновесия системы (7)

$$\theta(t) \equiv \theta_0, \eta(t) \equiv 0,$$

где θ_0 удовлетворяет соотношениям

$$\sin\theta_0 = \gamma, \cos\theta_0 > 0.$$

Этот режим возможен, когда $\gamma < 1$. В этом случае он является локально устойчивым.

Состояние равновесия системы (7)

$$\theta(t) \equiv \theta_1, \eta(t) \equiv 0,$$

где θ_1 удовлетворяет соотношениям

$$\sin\theta_1 = \gamma, \cos\theta_1 < 0,$$

является неустойчивым и соответствует физически нереализуемому режиму синхронной машины.

В случае $\gamma > 1$ система (7) не имеет состояний равновесия (ее стационарное множество пусто).

Заметим, что стационарные множества системы (4), (5) при $L = 0$ и при $L > 0$ совпадают. Сохраня-

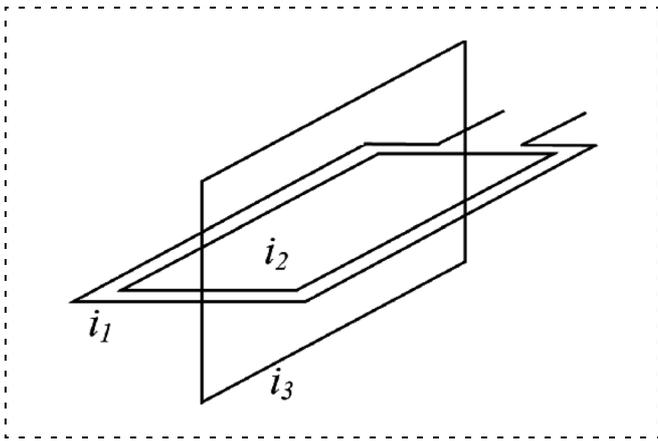


Рис. 4. Схема трех обмоток. Показаны два параллельных витка: виток обмотки возбуждения с током $i_1(t)$ и виток поперечной демпферной обмотки с током $i_2(t)$, а также ортогональный к ним виток продольной демпферной обмотки с током $i_3(t)$

ется также локальная устойчивость и неустойчивость стационарных решений при переходе от уравнения (6) (случай $L = 0$) к системе (4), (5) (случай $L \geq 0$).

Отметим, что угол θ называют рабочим углом синхронного двигателя, η — скольжением ротора.

Рассмотрим далее электромеханическую модель из трех обмоток, изображенную на рис. 4.

По-прежнему будем рассматривать движение обмоток во вращающейся системе координат, жестко связанной с вектором напряженности B магнитного поля. Введем параметры обмоток: S_1, S_2, S_3 — площади каждого из витков; L_1, L_2, L_3 — индуктивности обмоток; R_1, R_2, R_3 — сопротивления обмоток. Пренебрегая взаимной индукцией обмоток, получим систему уравнений для токов $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$:

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 i_1(t) &= S_1 B \sin \theta(t) \dot{\theta}(t) + e; \\ L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 i_2(t) &= S_2 B \sin \theta(t) \dot{\theta}(t); \\ L_3 \frac{di_3(t)}{dt} + R_3 i_3(t) &= S_3 B \cos \theta(t) \dot{\theta}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Динамика ротора с расположенными на нем тремя обмотками во вращающемся магнитном поле описывается уравнением

$$I \ddot{\theta} = -\beta n B (S_1 i_1(t) \sin \theta + S_2 i_2(t) \sin \theta + S_3 i_3(t) \cos \theta) - M. \quad (9)$$

Здесь n — по-прежнему число витков в каждой обмотке.

Пренебрегая индуктивностями демпферных обмоток, т. е. полагая в системе (8), (9) $L_2 = L_3 = 0$ и используя преобразование координат: $\theta := -\theta$,

$\eta = -\dot{\theta}$, $z = i_1(t) - e/R_1$, преобразуем систему (8), (9) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \eta; \\ \dot{\eta} &= -(a_1 + a_2 \cos 2\theta) \eta - a_3 z \sin \theta - (a_4 \sin \theta - a_5); \\ \dot{z} &= -a_6 z + a_7 \eta \sin \theta. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } a_1 &= \frac{\beta n B^2}{2I} \left(\frac{S_2^2}{R_2} + \frac{S_3^2}{R_3} \right), a_2 = \frac{\beta n B^2}{2I} \left(\frac{S_3^2}{R_3} - \frac{S_2^2}{R_2} \right), \\ a_3 &= \frac{\beta n B S_1}{I}, a_4 = \frac{\beta n S_1 B e}{I R_1}, a_5 = \frac{M}{I}, a_6 = \frac{R_1}{L_1}, a_7 = \frac{S_1 B}{L_1}. \end{aligned}$$

Система (10) приводится в монографии [2] в качестве уравнений неявнополюсного синхронного двигателя в случае приближенного учета демпферных обмоток.

Неособая замена переменных $\theta := -\theta$, $\eta = -\dot{\theta}$,

$$\begin{aligned} y_1 &= i_1 + \frac{S_1 B}{L_1} \cos \theta, y_2 = i_2 + \frac{S_2 B}{L_2} \cos \theta, y_3 = -i_3 + \\ &+ \frac{S_3 B}{L_3} \sin \theta \end{aligned}$$

приводит систему (8), (9) к виду

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \eta; \\ \dot{\eta} &= (-b_1 y_1 - b_2 y_2) \sin \theta - b_3 y_3 \cos \theta + b_4 \sin \theta \cos \theta + b_5; \\ \dot{y}_1 &= b_6 - b_7 y_1 + b_8 \cos \theta; \\ \dot{y}_2 &= -b_9 y_2 + b_{10} \cos \theta; \\ \dot{y}_3 &= -b_{11} y_3 - b_{12} \sin \theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Близкая к (11) система

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \eta; \\ \dot{\eta} &= (-a_1 x_1 - a_2 x_2) \sin \theta - a_3 x_3 \cos \theta + a_4 \sin \theta \cos \theta; \\ \dot{x}_1 &= a_5 - a_6 x_1 + a_7 x_2 + a_8 \cos \theta; \\ \dot{x}_2 &= a_9 x_1 - a_{10} x_2 + a_{11} \cos \theta; \\ \dot{x}_3 &= -a_{12} x_3 - a_{13} \sin \theta \end{aligned} \quad (12)$$

с положительными параметрами a_i ($i = 1, 2, \dots, 13$) такими, что $a_6 a_{10} - a_7 a_9 > 0$, рассматривалась в работе [16] в качестве системы уравнений синхронного двигателя с пулевой нагрузкой.

Неособым линейным преобразованием переменных y_1, y_2, y_3 система (11) может быть приведена к системе (12).

Все представленные здесь уравнения получены на основе общего подхода, связанного с введением системы координат, жестко связанной с вращающимся магнитным полем и движением электромеханической модели синхронной машины в этой системе координат. Такое рассмотрение весьма наглядно и упрощает вывод широко известных уравнений Горева—Парка [1–8] при сделанных здесь предположениях.

Явнополюсный ротор

Предположим теперь, что в пазах ротора располагается только обмотка возбуждения. Схематично она изображена на рис. 5.

Будем предполагать, что все четыре витка обмотки одинаковы. Как и в случае двух обмоток, будем рассматривать движение двух пар параллельных витков обмоток в системе координат, жестко связанной с вектором напряженности магнитного поля. Тогда токи $i_1(t)$, $i_2(t)$ и $i_3(t)$, $i_4(t)$ в первой и второй паре обмоток определяются уравнениями:

$$L \frac{di_1(t)}{dt} + Ri_1(t) = e + (2vB \sin \alpha) \sin \theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (13)$$

$$L \frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t) = e + (2vB \sin \alpha) \sin \theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (14)$$

$$L \frac{di_3(t)}{dt} + Ri_3(t) = e + (2vB \sin \alpha) \cos \theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (15)$$

$$L \frac{di_4(t)}{dt} + Ri_4(t) = e + (2vB \sin \alpha) \cos \theta(t) \dot{\theta}(t). \quad (16)$$

Здесь параметры R , L , B , e и переменный угол $\theta(t)$ имеют прежний смысл, v — коэффициент пропорциональности.

Уравнение движения ротора с расположенными на нем двумя парами параллельных витков обмотки возбуждения относительно вращающегося магнитного поля имеет вид

$$I \ddot{\theta} = -2\beta n l l_0 \sin \alpha [(i_1(t) + i_2(t)) \sin \theta + (i_3(t) + i_4(t)) \cos \theta] - M. \quad (17)$$

Здесь l — длина одной стороны рамки; l_0 — длина радиус-вектора вращения; n — число витков в каждой обмотке; β — коэффициент пропорциональности; α — угол, обозначенный на рис. 5.

Уравнения (13)—(17) являются уравнениями явнополюсной синхронной машины.

Предполагая, что $L = 0$, меняя θ на $-\theta$ и подставляя (13)—(16) в (17), получим уравнение

$$\ddot{\theta} + k \dot{\theta} + b \sin \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) = \gamma. \quad (18)$$

Здесь $k = 8\beta v n B^2 l l_0 \sin^2 \alpha / (IR)$, $b = 4\sqrt{2} \beta n e B l l_0 \times \sin \alpha / (IR)$, $\gamma = M/I$.

Замена переменной $\theta = \theta - \frac{\pi}{4}$ приводит уравнение (18) к рассмотренному выше уравнению (6).

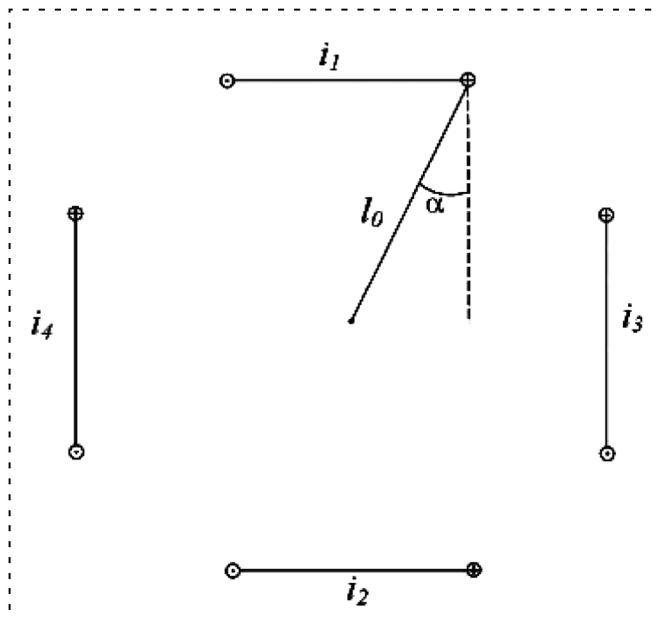


Рис. 5. Схема четырех обмоток. Показаны две ортогональные пары параллельных витков обмотки возбуждения (пара с токами $i_1(t)$ и $i_2(t)$ и пара с токами $i_3(t)$ и $i_4(t)$)

Отметим, что демпферный момент возникает при ортогональном расположении обмоток. Поэтому в явнополюсной машине этот момент обеспечивается обмотками возбуждения.

Введем обозначения:

$$a_\alpha = \frac{2vB}{L} \sin \alpha, \quad b_\alpha = \frac{2\beta n B l l_0}{I} \sin \alpha.$$

Заменим в системе (13)—(17) θ на $-\theta$ и перейдем от уравнения (17) к системе

$$\begin{aligned} \theta &= \eta; \\ \dot{\eta} &= -b_\alpha (i_1(t) + i_2(t)) \sin \theta + b_\alpha (i_3(t) + i_4(t)) \cos \theta - \gamma. \end{aligned} \quad (19)$$

Состояниями равновесия системы (13)—(16), (19) при условии

$$\gamma < \frac{\sqrt{2} e b_\alpha}{R} \quad (20)$$

являются точки $\theta = \theta_i + 2m\pi$ (m — целое число), $\eta = 0$, $i_1(t) = i_2(t) = i_3(t) = i_4(t) = e/R$. Здесь θ_i ($i = 0, 1$) — корни уравнения

$$\varphi(\theta) = \gamma, \quad (21)$$

где

$$\varphi(\theta) = \frac{\sqrt{2} e b_\alpha}{R} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right), \quad (22)$$

причем

$$\varphi'(\theta_0) > 0, \varphi'(\theta_1) < 0.$$

Стационарное множество системы (13)—(16), (19) пусто при условии

$$\gamma > \frac{\sqrt{2}eb_\alpha}{R}. \quad (23)$$

Матрица Якоби правой части системы (13)—(16), (19) после приведения этой системы к нормальному виду в стационарной точке $\theta = \theta_i, \eta = 0, i_1(t) = e/R, i_2(t) = e/R, i_3(t) = e/R, i_4(t) = e/R$ имеет вид

$$\begin{pmatrix} -p & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\varphi'(\theta_i) & -p & -b_\alpha \sin\theta_i & -b_\alpha \sin\theta_i & b_\alpha \cos\theta_i & b_\alpha \cos\theta_i \\ 0 & a_\alpha \sin\theta_i & -R/L-p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_\alpha \sin\theta_i & 0 & -R/L-p & 0 & 0 \\ 0 & -a_\alpha \cos\theta_i & 0 & 0 & -R/L-p & 0 \\ 0 & -a_\alpha \cos\theta_i & 0 & 0 & 0 & -R/L-p \end{pmatrix}$$

Устойчивость или неустойчивость ее характеристического полинома

$$f(p) = \left(\frac{R}{L} + p\right)^3 \left[p^3 + \frac{R}{L} p^2 + (2a_\alpha b_\alpha + \varphi'(\theta_i))p + \frac{R}{L} \varphi'(\theta_i) \right]$$

определяется устойчивостью или неустойчивостью полинома третьей степени, записанного в квадратных скобках.

Известно, что необходимыми и достаточными условиями устойчивости полинома

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$$

являются следующие условия:

$$a_2 > 0, a_1 > 0, a_0 > 0, a_2 a_1 - a_0 > 0, \quad (24)$$

которые иногда называют условиями Вышнеградского [11].

Легко видеть, что характеристический полином $f(p)$ устойчив при условии $\varphi'(\theta_i) > 0$ и неустойчив при условии $\varphi'(\theta_i) < 0$. Поэтому состояния равновесия $\theta = \theta_0 + 2m\pi$ (m — целое число), $\eta = 0, i_1(t) = e/R, i_2(t) = e/R, i_3(t) = e/R, i_4(t) = e/R$ являются устойчивыми. Они соответствуют рабочим режимам синхронного двигателя. Состояния равновесия $\theta = \theta_1 + 2m\pi, \eta = 0, i_1(t) = e/R, i_2(t) = e/R, i_3(t) = e/R, i_4(t) = e/R$ неустойчивы, т. е. физически нереализуемы.

Явнополюсный ротор с демпферными обмотками

Предположим далее, что в пазах явнополюсного ротора помимо обмотки возбуждения расположены две ортогональные короткозамкнутые демпферные обмотки с токами $i_5(t), i_6(t)$.

Рассмотрим электромеханическую модель из шести обмоток. Она состоит из двух ортогональных пар параллельных витков обмотки возбуждения (пара с токами $i_1(t)$ и $i_2(t)$ и пара с токами $i_3(t)$ и $i_4(t)$) и центрированной ортогональной пары демпферных обмоток с токами $i_5(t)$ и $i_6(t)$.

Будем считать, что параметры демпферных обмоток (L — индуктивность, R — сопротивление обмотки) совпадают с аналогичными параметрами обмотки возбуждения, S — площадь одного витка демпферной обмотки.

В системе координат, жестко связанной с вектором напряженности B магнитного поля, токи возбуждения $i_1(t), i_2(t), i_3(t), i_4(t)$ и демпферные токи $i_5(t), i_6(t)$ определяются уравнениями

$$L \frac{di_1(t)}{dt} + Ri_1(t) = e + (2vB \sin\alpha) \sin\theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (25)$$

$$L \frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t) = e + (2vB \sin\alpha) \sin\theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (26)$$

$$L \frac{di_3(t)}{dt} + Ri_3(t) = e + (2vB \sin\alpha) \sin\theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (27)$$

$$L \frac{di_4(t)}{dt} + Ri_4(t) = e + (2vB \sin\alpha) \cos\theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (28)$$

$$L \frac{di_5(t)}{dt} + Ri_5(t) = SB \sin\theta(t) \dot{\theta}(t); \quad (29)$$

$$L \frac{di_6(t)}{dt} + Ri_6(t) = SB \cos\theta(t) \dot{\theta}(t). \quad (30)$$

Уравнение движения ротора с обмоткой возбуждения и демпферными обмотками имеет вид

$$I\ddot{\theta} = -2\beta n B l l_0 \sin\alpha [(i_1(t) + i_2(t)) \sin\theta + (i_3(t) + i_4(t)) \cos\theta] - \beta_0 n_0 SB [i_5(t) \sin\theta + i_6(t) \cos\theta] - M,$$

где β_0 — коэффициент пропорциональности, n_0 — число витков в каждой из демпферных обмоток.

Состояниями равновесия системы (25)—(31) при условии (20) являются точки $\theta = \theta_i + 2m\pi$ (m — целое число), $\dot{\theta} = 0, i_1(t) = i_2(t) = i_3(t) = i_4(t) = e/R, i_5(t) = i_6(t) = 0$. Здесь θ_i ($i = 0, 1$) — корни уравнения (21), где функция $\varphi(\theta)$ определяется соотношением (22).

Стационарное множество системы (25)—(31) пусто при условии (23).

Матрица Якоби правой части системы (25)—(31) после приведения этой системы к нормальному виду в стационарной точке $\theta = \theta_i$, $\dot{\theta} = 0$, $i_1(t) = e/R$, $i_2(t) = e/R$, $i_3(t) = e/R$, $i_4(t) = e/R$, $i_5(t) = 0$, $i_6(t) = 0$ имеет вид

$$\begin{pmatrix} -p & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\varphi'(\theta_i) & -p & -b_\alpha \sin \theta_i & -b_\alpha \sin \theta_i & b_\alpha \cos \theta_i & b_\alpha \cos \theta_i & -d_0 \sin \theta_i & d_0 \cos \theta_i \\ 0 & a_\alpha \sin \theta_i & -\frac{R}{L} - p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_\alpha \sin \theta_i & 0 & -\frac{R}{L} - p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_\alpha \cos \theta_i & 0 & 0 & -\frac{R}{L} - p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_\alpha \cos \theta_i & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} - p & 0 & 0 \\ 0 & c_0 \sin \theta_i & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} - p & 0 \\ 0 & -c_0 \cos \theta_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R}{L} - p \end{pmatrix}.$$

Здесь

$$c_0 = \frac{SB}{L}, \quad d_0 = \frac{\beta_0 n_0 SB}{I}.$$

Характеристический полином матрицы Якоби

$$\left(\frac{R}{L} + p\right)^5 \left[p^3 + \frac{R}{L} p^2 + (c_0 d_0 + 2a_\alpha b_\alpha + \varphi'(\theta_i))p + \frac{R}{L} \varphi'(\theta_i) \right]$$

устойчив, если $\varphi'(\theta_i) > 0$, и неустойчив, если $\varphi'(\theta_i) < 0$. Следовательно, состояния равновесия $\theta = \theta_0 + 2m\pi$ (m — целое число), $\dot{\theta} = 0$, $i_1(t) = i_2(t) = i_3(t) = i_4(t) = e/R$, $i_5(t) = i_6(t) = 0$ являются устойчивыми и соответствуют рабочим режимам синхронного двигателя, а состояния равновесия $\theta = \theta_1 + 2m\pi$, $\dot{\theta} = 0$, $i_1(t) = i_2(t) = i_3(t) = i_4(t) = e/R$, $i_5(t) = i_6(t) = 0$ являются физически нереализуемыми.

Предполагая, что в (25)—(30) $L = 0$, меняя θ на $-\theta$ и подставляя (25)—(30) в (31), получим уравнение (18), где

$$k = \frac{\beta_0 n_0 (SB)^2}{I} + \frac{8\beta n v B^2 l l_0 \sin^2 \alpha}{IR},$$

$$b = \frac{4\sqrt{2}\beta n e B l l_0 \sin \alpha}{IR}, \quad \gamma = \frac{M}{I},$$

которое заменой переменной $\theta = \theta - \frac{\pi}{4}$ вновь приводится к рассмотренному выше уравнению (6).

Список литературы

1. Гоуев А. А. Переходные процессы синхронной машины. Л.: Наука, 1985. 502 с.
2. Янко-Триницкий А. А. Новый метод анализа работы синхронных двигателей при резкопеременных нагрузках. М.-Л.: ГЭИ, 1958. 104 с.
3. Кононенко Е. В., Сипайлов Г. А., Хорьков К. А. Электрические машины (спец. курс). М.: Высшая школа, 1975. 279 с.
4. Важнов А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1969. 768 с.
5. Адкинс Б. Общая теория электрических машин. М.-Л.: ГЭИ, 1960.
6. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1980. 832 с.
7. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
8. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
9. Szego G. P., Olech C., Celling A. On the stability properties of a third order system // Ann. mat. pura ed appl. 1968. № 91. 103.
10. Леонов Г. А. Фазовая синхронизация. Теория и приложение // Автоматика и телемеханика. 2006. № 10. С. 47—86.
11. Леонов Г. А. Теория управления. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. 234 с.
12. Tricomi F. Sur une equation differentielle de l'electrotechnique, C. R. Acad. Sci. Paris, 1931. T. 193. V. 635—636.
13. Tricomi F. Integrazione di unequazione differenziale presentata in elettrotechnica. — Annali della R. Scuola Normale Superiore di Pisa Scienze Fisiche e Matematiche. Serie II. Vol. II. Fasc. 1. 1933. P. 1—20.
14. Андронов А. А., Бутт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 915 с.
15. Барбашин Е. А., Табуева В. А. Динамические системы с цилиндрическим фазовым пространством. М.: Наука, 1969. 299 с.
16. Fagioli E., Szego G. P. Qualitative analysis by Modern methods of a stability problem in power-system analysis. J. Franklin Institute. 1970. V. 290. № 2.

НОВАЯ КНИГА

Леонов Г. А., Кондратьева Н. В. Анализ устойчивости электрических машин переменного тока. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. — 259 с.

В книге содержится последовательное изложение математических методов исследования устойчивости электрических машин переменного тока. Рассмотрены электромеханические модели синхронных и асинхронных машин, использующие систему координат, жестко связанную с вращающимся магнитным полем. Изложены методы локального и глобального анализа устойчивости решений дифференциальных уравнений, описывающих синхронные и асинхронные машины.

Книга предназначена для специалистов по теоретической и прикладной механике, электрическим машинам переменного тока, дифференциальным уравнениям и динамическим системам.

М. И. Евстифеев, д-р техн. наук,
ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург
evstifeevm@mail.ru

Проблемы проектирования и опыт разработки микромеханических гироскопов

Представлены основные этапы разработки отечественных микромеханических гироскопов. Освещена история их создания, начиная с конструкций первых образцов до испытаний приборов и систем, разработанных в ЦНИИ "Электроприбор". Проанализированы проблемы проектирования с учетом специфики используемых материалов, технологии и выбранных конструктивных решений.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, упругий подвес, кремний.

Введение

Первые сведения в России о микромеханических чувствительных элементах, используемых для задач навигации и управления движением, были представлены в 1994 г. начальником отдела Лаборатории им. Ч. Дрейпера Нейлом Бабуром на первой международной конференции по интегрированным навигационным системам, проходившей в ЦНИИ "Электроприбор" [1]. Эта работа показала значительные достижения Лаборатории им. Ч. Дрейпера в области разработки микромеханических элементов и открыла новые направления развития технологий для создания традиционных приборов в оригинальном исполнении, обладающих рядом существенных преимуществ. К этим преимуществам были отнесены их минимальные массогабаритные характеристики, низкие показатели себестоимости и энергопотребления. Наличие перечисленных достоинств, несмотря на невысокую точность, открыло широкие перспективы использования таких приборов в областях, которые раньше находились вне поля зрения разработчиков отечественных гироскопов и акселерометров.

Российские разработки микромеханических гироскопов (ММГ) в это время существенно отставали от зарубежных аналогов. Причинами отставания для большинства отечественных разработок являлись низкий уровень технологии изготовления кремниевых микроустройств и отсутствие опыта проектирования, который существенным образом зависит от возможностей производства.

В 1997 г. директором ЦНИИ "Электроприбор" В. Г. Пешехоновым была поставлена задача исследования возможности создания собственных микромеханических чувствительных элементов и поиска

технологической базы, способной воплотить требуемые технические характеристики. Был обследован ряд отечественных предприятий, однако на тот момент ни одно из них не имело всех необходимых технологических операций (особенно глубокого травления кремния на глубину более 15 мкм) и замкнутого цикла изготовления.

В это же время для освоения специфики нового направления проф. Л. П. Несенюк и автор статьи подключились к разработке ММГ, проводимой АОЗТ "Гирооптика" (ген. директор, доктор философии И. В. Попова) совместно с Лабораторией микро-технологий и микроэлектромеханических систем (МТ и МЭМС) Санкт-Петербургского государственного технического университета (зав. лаб., канд. техн. наук Е. Н. Пятыхшев). Научное руководство разработкой приборов осуществлял проф. А. М. Лестев. В 1997 г. лаборатория не имела всего требуемого оборудования, однако изобретательность и новаторство Е. Н. Пятыхшева и его сотрудников позволили в короткие сроки сформировать технологический процесс ММГ и получить в 1998 г. первые образцы.

Предложенная технология "кремний на стекле" предусматривала ряд операций, состоящих из глубокой диффузии бора и формирования кремниевой заготовки путем реактивного ионного травления, профилирования стеклянного основания, операции сварки этих пластин с последующим удалением балластной массы кремния и разделения на отдельные чипы [2]. Операции корпусирования, приварки контактов и герметизации выполнялись традиционными для производства электронных микросхем методами. В качестве конструктивных схем были выбраны схема дискового (роторного) ММГ и двухмассовая схема камертонного ММГ [1, 2].

Первые образцы имели толщину подвижной части от 10 до 15 мкм, диаметр ротора 1,5 мм, сравнительно низкую вертикальность и шероховатость боковых поверхностей, достаточно большие зазоры (порядка 5 мкм), неравномерную ширину упругих элементов, выгибание подвижной части и выход из зацепления зубцов. Несмотря на все сложности, приборы были изготовлены, проведены их первые включения и испытания, а автор статьи приобрел опыт проектирования ММГ, в том числе и использования конечно-элементного анализа в программе Pro/MECHANICA [2].

Начало разработки и обоснование конструкции

В 2000 г. руководством института было принято решение развивать собственное направление микро-механики. Группу по разработке ММГ возглавил

канд. техн. наук С. Г. Кучерков, научное руководство осуществлял проф. Л. П. Несенюк. Неотработанная технология, отсутствие современного оборудования и трудности серийного изготовления приборов на отечественных предприятиях привели к необходимости использования достижений зарубежных компаний. В 2001 г. благодаря усилиям проф. Л. П. Несенюка и проф. И. К. Мешковского (СПбГУ ИТМО) были налажены контакты с фирмой TRONIC'S Microsystems (Гренобль, Франция) и заключен контракт на изготовление пробной партии образцов.

Французские коллеги предложили использовать технологию "кремний на изоляторе" как более освоенную на предприятии и подходящую для изготовления чувствительного элемента. На первых этапах подвижная часть ротора выращивалась в виде эпитаксиального слоя кремния на изоляторе (оксиде кремния), который диффузионно сварен с кремниевой подложкой. Требования, которые предъявлялись к технологии ММГ, были следующими: объем кремниевого чипа не более 1 см^3 , диаметр ротора 3 мм, толщина ротора 20 мкм, ширина упругих элементов около 10 мкм, соотношение размеров при травлении 1:100, зазоры в конструкции 2 мкм, точность изготовления лучше 0,1 мкм, вакуум 10^{-3} мм рт. ст., добротность осциллятора не менее 1000. Для выполнения требований по вакуумированию было предложено поместить ротор в стандартный герметичный керамический корпус LCC-18.

В качестве конструктивной схемы была выбрана схема дискового ММГ (рис.1) с внутренним упругим подвесом, состоящим из четырех прямых стержней. Диск на упругом подвесе под действием гребенчатого двигателя совершает первичные угловые колебания с частотой f_1 вокруг оси, перпендикулярной плоскости диска. Вторичные угловые ко-

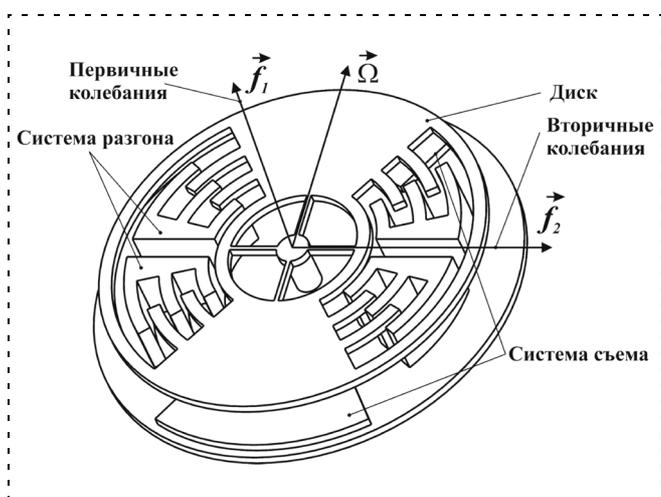


Рис. 1. Конструктивная схема ММГ

лебания диска, возникающие при воздействии переносной угловой скорости, измеряются емкостной системой, электроды которой расположены под или над диском. Собственные частоты первичных f_1 и вторичных f_2 колебаний выбирались на уровне 3 кГц, а резонансная настройка, характеризуемая разностью частот, определялась разностью размеров (длин и ширин) стержней упругого подвеса.

Выбор описанной конструктивной схемы ММГ обуславливался следующими обстоятельствами:

- использование вращательных движений ротора определяет низкую чувствительность измерителя к поступательной вибрации основания;
- относительные движения в плоскости диска обеспечивают большую амплитуду первичных колебаний, что повышает чувствительность прибора;
- размещение упругого подвеса внутри диска создает конструкцию с максимальным моментом инерции, эффективно увеличивает площадь электродов емкостного измерителя вторичных колебаний и обуславливает минимальные механические деформации в условиях тепловых воздействий.

Для передачи проектной документации ММГ иностранному исполнителю потребовалось срочно получить охранные документы, которые были оформлены в виде авторского свидетельства на полезную модель [3]. Следует отметить, что все последующие документы на конструкцию и программное обеспечение передавались французской стороне после подачи заявок на патенты, а основные результаты исследований — после их публикации.

Основные этапы технологического процесса изготовления вакуумированного кремниевого модуля (ВКМ), предложенные фирмой TRONIC'S, состояли в следующем. На одной кремниевой пластине (крышке) наносились металлические электроды для емкостной системы съема, на второй кремниевой пластине методами травления формировался подвижный диск с упругими элементами. На этой кремниевой пластине (вафле) размещалось 296 образцов. Затем эти пластины сваривались, выполнялась разрезка на отдельные чипы, которые помещались в керамический корпус, проводился монтаж проводов на контакты корпуса. Корпус герметизировался металлической крышкой с геттером, предназначенным для поддержания внутреннего вакуума [4].

Первые образцы были получены в конце 2002 г. После изготовления измеряли сопротивления в электрических цепях гироскопа, емкости гребенчатого двигателя и системы съема. Большинство образцов по этим параметрам оказались годными, а измеренные величины близки к расчетным (емкость системы съема составляла около 3 пФ). Тем не ме-

нее, первые включения изготовленных образцов показали проблемы с вакуумированием и подвижностью ротора. Отсутствие вакуумирования объяснялось сложностями с активацией геттера после герметизации корпуса.

Для тестирования изделий в условиях низкого вакуума и определения подвижности ротора было предложено измерять статические отклонения диска под воздействием электрического напряжения, подаваемого на один из электродов системы съема. Измерения емкости на втором электроде показали зависимость, близкую к квадратичной, и, таким образом, была доказана подвижность ротора. Такие испытания выявили еще одну проблему — низкий процент выхода годных изделий (на уровне 8 %).

Вскрытие образцов обнаружило повреждение упругих элементов подвеса и следы касания диском электродов съема. Анализ технологии изготовления на предприятии TRONIC'S показал, что для вакуумирования при сварке корпуса с крышкой используется высокопроизводительное оборудование, которое вызывает поломки упругого подвеса вследствие быстрого удаления остатков воздуха из полости под диском.

Модификация конструкции

В середине 2003 г. были проведены разработка и согласование новой модификации конструкции ВКМ, обеспечивающей при реализуемой технологии изготовления выполнение технических требований по установке чипа в корпус LCC-18 и вакуумированию.

Основная доработка конструкции ВКМ заключалась в увеличении толщины ротора и элементов подвеса с 20 мкм до 60 мкм, что значительно увеличило линейную жесткость подвеса в направлении, перпендикулярном плоскости ротора, и повысило его стойкость к вакуумным ударам. На этот момент на рынке уже появились промышленно изготовленные пластины кремния, разделенные слоем изолятора, так что потребность в эпитаксиальном выращивании кремния отпала.

Очевидно, что указанная доработка одновременно значительно увеличила и угловые жесткости подвеса, что отрицательно сказалось на чувствительности прибора. Для снижения влияния аэродинамических эффектов при вакуумировании ВКМ введены дополнительные отверстия в крышке чипа и канавки специальной формы, а также увеличен радиальный зазор между диском и основанием чипа до 50 мкм. Для исключения эффекта касания диска и электродов крышки в конструкции были введены упоры, расположенные на периферии крышки чипа.

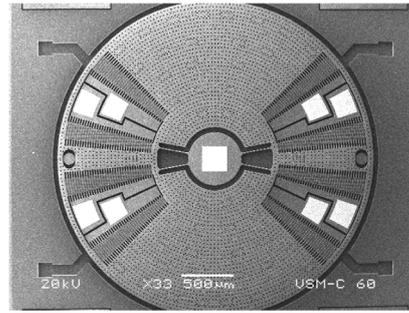


Рис. 2. Угловое расположение стержней подвеса

Для сохранения собственных угловых частот на уровне 3000 Гц и резонансной настройки подвеса была существенно доработана конструкция упругих элементов подвеса — уменьшена их ширина с 12 мкм до 10 мкм, вместо ортогональной схемы подвеса введен угловой разворот упругих стержней относительно оси симметрии ротора (рис. 2). Меняя только один параметр — угол положения стержней, можно осуществлять точную резонансную настройку подвеса [5].

Группой под руководством С. Г. Кучеркова, в состав которой входили будущие канд. техн. наук Ю. В. Шадрин и А. С. Ковалев, совместно с кафедрой проф. Л. А. Северова (СПб ГУАП) были сформулированы требования к функционированию прибора, определены его основные характеристики, разработаны основы алгоритмов и структурных схем, установлены принципы использования "электрической" жесткости для изменения собственных частот прибора и резонансной настройки подвеса [6, 7].

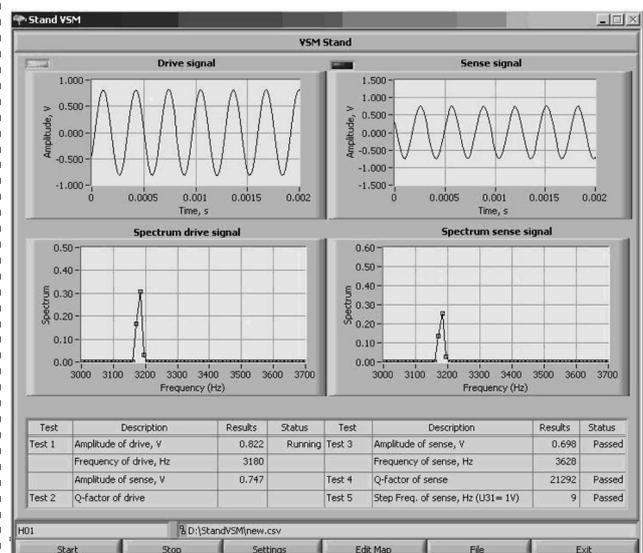


Рис. 3. Виртуальный стенд для проверки параметров

Электронная часть прибора была разработана группой Я. А. Некрасова [8]. В состав аналоговой электроники, обеспечивающей работу ММГ, входили: двухканальный преобразователь "емкость — напряжение", блок формирования управляющих напряжений гребенчатого двигателя и блок выделения полезного сигнала. Для входного контроля продукции французской фирмы Н. В. Моисеевым и Я. А. Некрасовым был спроектирован специализированный стенд, который включал аппаратную часть (персональный компьютер, плату АЦП, плату зарядного устройства с установленным на ней ВКМ, плату автогенератора) и программную часть, реализованную в пакете LabView (рис. 3).

Виртуальный стенд позволяет определить все параметры образцов ВКМ, а именно: частоты, добротности и амплитуды собственных первичных и вторичных колебаний. Тест считался пройденным, если параметры оставались выше заданных значений в течение программно установленного промежутка времени. После выполнения теста все измеренные параметры автоматически документировались в соответствующем файле программы. Аналогичный стенд был передан французской стороне для выходного контроля образцов и согласования методик тестирования параметров ВКМ.

Решение проблемы вакуумирования позволило добиться высоких показателей добротности образцов, полученных в 2004 г. Так, значение добротности для контура первичных колебаний оказалось не менее 100 000, а для вторичных — не менее 50 000, что характеризовало высокий уровень изготовления всех элементов ВКМ. Значения добротности в отдельных образцах достигали 700 000 и 100 000 соответственно.

В процессе разработки электронных систем управления и обработки данных были проведены сравнительные испытания экспериментального ММГ и гироскопа ADXRS 150 фирмы Analog Devices. Результаты испытаний показали сравнимые характеристики, однако шумы ВКМ с пробной электроникой оказались в четыре раза больше, чем шумы ADXRS 150 [8].

Тестирование полученных образцов выявило и другие проблемы. Одна из них состояла в существенном несовпадении (более 20 %) расчетных значений собственных частот с измеренными значениями. Ранее, до изготовления, были определены основные источники погрешностей формообразования и предложена методика расчета собственных частот в зависимости от вариаций геометрических размеров упругих элементов [9]. Методика адекватно отражала изменения собственных частот, но

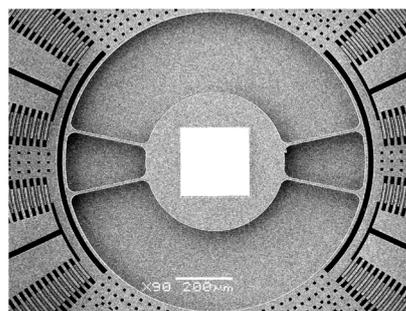


Рис. 4. Дугообразные перемычки в местах заделки упругих элементов

реальные значения отличались от расчетных. Уточнение расчетной модели, выполненное канд. техн. наук А. А. Унтиловым [10], потребовало учета анизотропии характеристик монокристаллического кремния, из которого изготавливался упругий подвес. После определения положения фотолитографического рисунка подвеса ротора относительно осей анизотропии пластины монокристаллического кремния удалось снизить погрешность расчета до 5...10 %.

Вторая проблема, которая возникла при испытаниях ММГ, заключалась в неустойчивости и срыве первичных колебаний, особенно при разгоне ротора. Анализ этих явлений показал, что их причиной является нелинейность упругой характеристики подвеса вследствие жесткой заделки упругих элементов в диск ротора [11]. Для преодоления этой проблемы было предложено прорезать области крепления упругих элементов к диску, создав, таким образом, две гибкие дугообразные перемычки (рис. 4). Такое решение существенно уменьшило нелинейность упругой характеристики подвеса (более чем в 50 раз) и исключило явления неустойчивости первичных колебаний [12].

Первые экспериментальные образцы

В 2005 г., после кончины С. Г. Кучеркова, группу по разработке ММГ возглавил д-р техн. наук Д. Г. Грязин. Основное внимание в этот период уделялось разработке методик испытаний и стендов для их проведения, оценке метрологических характеристик приборов, созданию автоматизированных процедур расчета и проектирования ММГ как мехатронной системы [13]. Были спроектированы стенды для повышенных значений угловых скоростей (более 1000°/с), выполнен значительный объем испытаний на вибрационных и ударных стендах и на стенде вращения Acutronic, проведены температурные исследования характеристик приборов.

Предложено и реализовано программное обеспечение для расчета параметров ММГ в зависимости от заданных характеристик [14]. С использованием разработанного программного комплекса выполнены расчеты конструкции и систем управления, оценены температурные режимы работы. Измеренные значения механических параметров (собственные частоты) и динамических характеристик (время готовности, динамический диапазон, полоса пропускания и т. д.) совпали с расчетными значениями с погрешностью менее 5 %.

Испытания более тысячи образцов ВКМ, изготовленных в 2005 г. и прошедших начальные тесты, показали, что 96 % из них оказались годными по всем проверяемым параметрам: амплитудам, собственным частотам, добротности. Это создало основу для разработки первого экспериментального образца ММГ-1, электроника которого состояла из трех электронных плат [4].

Проведенные исследования и испытания собранных экспериментальных образцов показали достижимость точности прибора на уровне $0,1^\circ/\text{с}$ при диапазоне измерения $1000^\circ/\text{с}$ и готовность разработанного техпроцесса к переходу к серийному изготовлению ММГ. На основе этих результатов в 2005 г. специалистами ЦНИИ "Электроприбор" и представителями французской фирмы TRONIC'S был сделан доклад на международной конференции Symposium Gyro Technology в Штутгарте (Германия), подводивший определенные итоги совместной четырехлетней работы [15].

Улучшение характеристик гироскопов

Экспериментальная проверка образцов ВКМ показала, что амплитуда квадратурной помехи по отношению к величине полезного сигнала может варьироваться в диапазоне 100...1000. Для устранения квадратурной помехи было предложено разместить в конструкции дополнительные электроды над зубцовой зоной (над зоной гребенчатого двигателя) [16]. Это создало возможность, прикладывая электрическое напряжение к электродам, свести квадратурную составляющую сигнала практически до нуля и повысить точность прибора.

Испытания образцов ВКМ на вибрационном стенде в диапазоне частот от 0,01 до 5 кГц и с амплитудой до 32g выявили чувствительность подвеса к поступательной вибрации. Определено, что на половинной частоте вторичных колебаний наблюдается "срыв" первичных колебаний, обусловленный резонансным усилением колебаний от неравножесткости упругого подвеса [17]. На частоте, равной

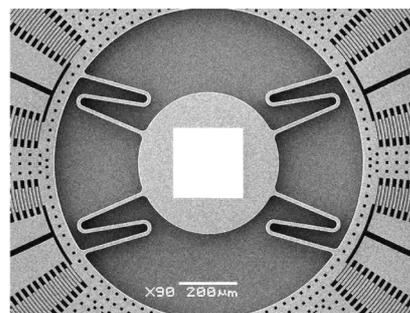


Рис. 5. Равножесткий упругий подвес

разности частот первичных и вторичных колебаний, также наблюдалось усиление вторичных колебаний, но без явлений "срыва". Исследования этого явления показали, что причина усиления колебаний вызвана так называемым "гантельным эффектом", обусловленным анизотропией инерционных свойств ротора и угловыми скоростями движения стенда [18].

Для повышения стойкости ММГ к поступательной вибрации было предложено изменить конструкцию упругого подвеса [19]. В этом подвесе (рис. 5) упругие элементы имеют зигзагообразную форму, а отрезок упругого элемента, соединенный с диском, расположен не радиально. Это обеспечивает равножесткость подвеса в плоскости, проходящей через ось чувствительности и ось первичных колебаний (направления Ω и f_1 на рис. 1). Путем изменения угла разворота отрезка упругого элемента возможна точная настройка подвеса по поступательным жесткостям и соответствующим частотам. Нелинейность упругой характеристики этого подвеса примерно в 200 раз меньше, чем подвеса с прямыми упругими элементами (см. рис. 2).

В процессе проектирования ММГ уделялось значительное внимание вопросам достижения максимальной чувствительности прибора, обеспечения требуемых частотных свойств, разработки равножестких конструкций упругих подвесов, точности изготовления упругих элементов с учетом особенностей технологии изготовления [20].

Общий подход к описанию ММГ потребовал составления математической модели шестистепенного упругого подвеса инерционного тела. На основе анализа модели были сформулированы требования к структуре и элементам матрицы жесткости подвеса, определено влияние технологических погрешностей и нелинейности упругого подвеса [21]. В решение теоретических вопросов и создание основ проектирования ММГ большой вклад внес Заслуженный деятель науки проф. И. Б. Челпанов.

Перспективные модификации приборов

Новая конфигурация подвеса и необходимость сокращения числа электронных плат для уменьшения паразитных связей привели к созданию модификации ММГ-2 (рис. 6). Электроника вместе с ВКМ размещена на круглой плате диаметром 49 мм. Здесь все операции, за исключением преобразования "емкость — напряжение", реализованы в цифровом виде, что уменьшило размеры и снизило потребляемую мощность до 0,6 Вт. Расширен набор интерфейсов для связи с потребителем: помимо интерфейса RS-232 информация может выдаваться по каналу CAN, прибор также имеет аналоговый выход по напряжению. ММГ-2 имеет прочный металлический корпус, а подключение к внешним цепям осуществляется с помощью разъемного соединителя. Габаритные размеры ММГ-2 составляют $50 \times 50 \times 18$ мм [22].

В 2006 г. начата работа над созданием бескорпусного образца ВКМ с размерами $6 \times 6 \times 4$ мм, герметизируемого на уровне вафли, и специализированной интегральной микросхемы ASIC для замены используемой сегодня в гироскопе микроэлектроники. Целью этой работы является сокращение габаритных размеров и стоимости ММГ. Основные проблемы, которые пришлось решать на этом этапе, заключались в создании устойчивой технологии сварки двух вафель с обеспечением герметичности, изменении конфигурации выходных контактов, размещении и активации геттера для поддержания требуемой величины вакуума, отработки топологии и функционирования микросхемы. В настоящее время все технологические проблемы изготовления бескорпусного ВКМ и микросхемы ASIC решены, полученные компоненты имеют стабильные технические характеристики (рис. 7, см. третью сторону обложки). Проводятся работы по сопряжению нового ВКМ и специализированной микросхемы, разрабатывается конструкция миниатюрного ММГ.

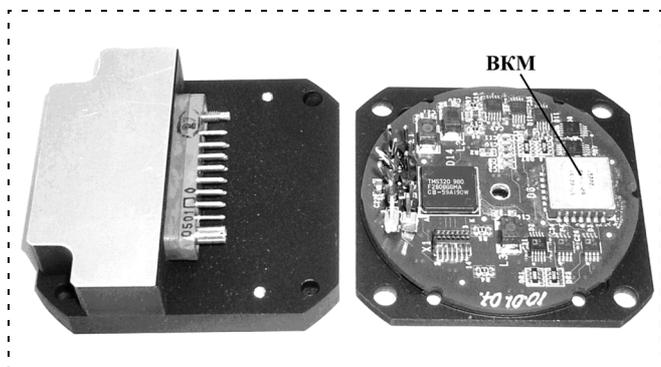


Рис. 6. Образец ММГ-2 с одной платой электроники

Завершение этих работ в ближайшее время позволит создать пригодный для крупносерийного и массового производства ММГ объемом до 1 см^3 , имеющий класс точности $0,01^\circ/\text{с}$ и минимальное энергопотребление [23].

Дальнейшие направления работ

В 2007 г. группу по разработке ММГ возглавил канд. техн. наук Я. А. Некрасов. Группой в настоящее время разработаны предложения по модификации конструкции ВКМ, обеспечивающие повышение точности ММГ. Эти предложения включают совершенствование электроники для подавления квадратурной помехи, увеличение толщины изоляционного слоя под электродами крышки, заземление слоя металлизации на периметре основания и крышки. Проводится работа по обеспечению устойчивой резонансной настройки частот первичных и вторичных колебаний при сохранении требований по диапазону измерений и полосе пропускания прибора. Успешное завершение этих работ позволит значительно снизить уровень шумовых характеристик и увеличить чувствительность до $0,001...0,005^\circ/\text{с}$, что существенно расширит области использования ММГ.

На основе существующих модификаций приборов в ЦНИИ "Электроприбор" разработаны образцы инерциальных измерительных модулей и интегрированной инерциально-спутниковой системы ориентации и навигации (ИСОН), предназначенные для широкого применения на наземном транспорте, маломерных судах, малых самолетах и беспилотных летательных аппаратах. Опытный образец ИСОН выполнен в виде единого прибора цилиндрической формы диаметром 100 мм и высотой 55 мм. Прибор состоит из трех электронных плат, на которых установлены три собственных ММГ, триада микроакселерометров, сигнальный процессор, миниатюрный 16-канальный GPS-приемник и вторичный источник питания. В настоящее время проводятся экспериментальные исследования ИСОН в условиях лаборатории и на автомобиле [22, 23].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, проекты 07-08-00699 и 08-08-12032-офи.

Список литературы

1. Barbour N., Elwell J., Setterlund R., Schmidt G. Inertial Instruments: Where to Now? // Proc. of 1st Intern. Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation, Saint Petersburg, Russia. 1994. P. 11–22.
2. Лестев А. М., Попова И. В., Пяташев Е. Н., Лурье М. С., Семенов А. А., Евстифеев М. И. Разработка и исследование микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 1999. № 2. С. 3–10.

3. **Свидетельство** на полезную модель № 18768 РФ, МПК 7 G01 С 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп // Евстифеев М. И., Кучерков С. Г., Несенюк Л. П., Пешехонов В. Г., Унтилов А. А.; заявл. 12.03.2001; опубл. 10.07.2001. Бюл. № 19. С. 3.

4. **Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П.** Микромеханический гироскоп. Проблемы создания и разработки в ЦНИИ "Электроприбор" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 32—36.

5. **Патент № 2289788 РФ**, МПК G01 С 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп // Евстифеев М. И., Несенюк Л. П., Пешехонов В. Г., Унтилов А. А.; заявл. 18.05.2005; опубл. 20.12.2006. Бюл. № 35. 8 с.

6. **Кучерков С. Г., Шадрин Ю. В.** К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа // Навигация и управление движением: Матер. III конф. молодых ученых. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2001. С. 94—101.

7. **Северов Л. А., Несенюк Л. П., Кучерков С. Г.** и др. Информационные характеристики микромеханического вибрационного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2003. № 1. С. 76—82.

8. **Пешехонов В. Г.** и др. Результаты разработки микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2005. № 3. С. 44—51.

9. **Евстифеев М. И., Унтилов А. А.** Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2003. № 2. С. 24—31.

10. **Унтилов А. А.** Влияние анизотропии монокристаллического кремния на характеристики микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением: Матер. VI конф. молодых ученых. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2005. С. 154—161.

11. **Davis W. O., Pisano A. P.** Nonlinear Mechanics of Suspension Beams for a Micromachined Gyroscopes // Modeling and Simulation of Microsystems. 2001. P. 270—273.

12. **Патент № 2269746 РФ**, МГЖ G01 С 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп // Евстифеев М. И., Несенюк Л. П., Пешехонов В. Г., Унтилов А. А.; заявл. 06.12.2004; опубл. 10.02.2006. Бюл. № 4. 8 с.

13. **Евстифеев М. И., Кучерков С. Г., Унтилов А. А., Шадрин Ю. В., Шалобаев Е. В.** Анализ компьютерных средств проектирования микромеханических гироскопов с позиций меха-

троники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 2. С. 31—37.

14. **Баженев А. Г., Грязин Д. Г., Евстифеев М. И.** и др. Специализированный программный комплекс проектирования микромеханических инерциальных датчиков // Гироскопия и навигация. 2007. № 3. С. 52—61.

15. **Peshkhanov V. G., Renard S., Pfluger P.** et al. Development and Test Results of a Micromechanical Disc-shape Gyroscope // Proc. of Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany. 2005. P. 8.0—8.10.

16. **Андреева Т. А., Некрасов Я. А.** Система подавления квадратурной помехи в выходном сигнале микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением: Матер. VII конф. молодых ученых. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2006. С. 175—181.

17. **Евстифеев М. И.** Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. 2002. № 2. С. 19—25.

18. **Вольфсон Г. Б., Евстифеев М. И.** Особенности динамики прецизионных приборов с анизотропией инерционных свойств вывешенного тела с вращательными степенями свободы // Тр. IX Четаевской конф. "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением", посвященной 105-летию Н. Г. Четаева. ИДСТУ СО РАН, Иркутск. 2007. Т. 4. С. 47—61.

19. **Патент № 2296302 РФ**, МПК G01 С 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп // Евстифеев М. И., Несенюк Л. П., Пешехонов В. Г., Унтилов А. А.; заявл. 15.11.2005; опубл. 27.03.2007. Бюл. № 9. 8 с. (Patent WO 2007/058565 A1 PCT/RU2006/000558. Micromechanical oscillating gyroscope, 24.05.2007).

20. **Евстифеев М. И.** Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2004. № 1. С. 27—39.

21. **Евстифеев М. И.** Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. 2007. № 2. С. 63—76.

22. **Пешехонов В. Г.** и др. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ "Электроприбор" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 2. С. 29—31.

23. **Пешехонов В. Г.** и др. Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Гироскопия и навигация. 2008. № 3. С. 3—12.

ИНФОРМАЦИЯ

28 сентября—4 октября 2009 г.

пос. Дивноморское Геленджикский район, Краснодарский край

В рамках Международной научно-технической мультikonференции

"Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники" (ИКТМР-2009)

состоится локальная научно-техническая конференция

"ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. НАНО-, МИКРО- И МАКРОРОБОТЫ" (ЭР-2009)

Председатель — профессор Е. И. Юевич

Направления конференции

- ◆ Научно-технические проблемы экстремальной робототехники.
- ◆ Теория и методы проектирования робототехнических систем.
- ◆ Нано- и микротехнологии в робототехнике.
- ◆ Компоненты систем экстремальной робототехники.
- ◆ Опыт применения систем экстремальной робототехники.

Подробную информацию о мультikonференции ИКТМР-2009 и локальной конференции ЭР-2009 см. на сайте <http://www.mvs.tsure.ru>



К юбилею академика РАН В. Г. Пешехонова

ПЕШЕХОНОВ Владимир Григорьевич — Генеральный директор ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", государственного научного центра РФ ЦНИИ "Электроприбор", доктор технических наук (1976), профессор (1990), академик РАН (2000), лауреат Ленинской премии (1984), лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники (1998), лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники (2006). Награжден орденом "За заслуги перед Отечеством" IV степени. Почетный судостроитель (2003), Лауреат "Золотой Книги Санкт-Петербурга" (2001). Почетный доктор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" (2003).

Выдающийся ученый в области систем навигации и управления движением, крупный организатор науки.

Автор более 240 научных публикаций.

Владимир Григорьевич Пешехонов родился 14 июня 1934 г. в Ленинграде.

В 1958 г. с отличием окончил радиофизический факультет Ленинградского политехнического института. С 1958 г. работает в ЦНИИ "Электроприбор": инженер, аспирант, ведущий инженер, нач. лаборатории, нач. сектора, нач. отделения, зам. директора по научной работе ЦНИИ "Электроприбор" (1978—1983), первый зам. генерального директора по научной работе ЛНПО "Азимут", главный инженер ЛНПО "Азимут" и ЦНИИ "Электроприбор" (1983—1991), с 1991 г. — директор ЦНИИ "Электроприбор", с 29.12.2008 г. — генеральный директор ОАО "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор".

Среди первых достижений В. Г. Пешехонова — решение проблемы пространственной фильтрации сигналов естественных космических источников излучения, позволившее создать новое средство астронавигации, и разработка корабельных антенн первой космической системы навигации и связи. В ходе этих работ сложился творческий стиль В. Г. Пешехонова, основанный на умении решать принципиально новые задачи и доводить работу до создания образцов новой техники для Военно-морского флота.

В 1973 г. В. Г. Пешехонов был назначен главным конструктором навигационных комплексов, разрабатываемых ЦНИИ "Электроприбор". Им сформулированы принципы построения, и под его руководством разработаны комплексы трех поколений. В составе этих комплексов были созданы уникальный прецизионный гироскоп с электростатическим подвесом ротора, прецизионные инерциальные навигационные системы, высокостабильные морские гравиметры, высокоточные средства коррекции, сложные вычислительные системы. В короткие сроки было освоено их производство, и с 1977 г. Военно-морскому флоту поставлено более 50 комплексов. В. Г. Пешехонов активно участвовал в отработке и испытаниях навигационных комплексов на атомных подводных лодках и атомном крейсере, в том числе был техническим руководителем испытаний комплекса в ходе первого зимнего похода советской атомной подводной лодки к Северному географическому полюсу в марте 1980 г.

В 1991 г. В. Г. Пешехонов стал директором ЦНИИ "Электроприбор". В первые трудные для оборонной промышленности годы реформ ему удалось сохранить основной творческий состав института, диверсифицировать тематику, модернизировать основные разработки в соответствии с требованиями мирового рынка и наладить экспорт продукции.

Институт разрабатывает и поставляет инерциальные навигационные комплексы, инерциальные системы навигации и стабилизации, системы предполетного навигационного обеспечения и безопасной посадки палубных летательных аппаратов, миниатюрные интегрированные инерциальные/спутниковые навигационные системы, перископы и оптронные мачты, мобильные (морские и авиационные) гравиметры, системы ориентации космических аппаратов, системы измерения микроускорений на борту космических аппаратов, автоматизированные корабельные комплексы радиосвязи, антенно-фидерные и коммутационные корабельные устройства связи, гидроакустические комплексы и системы подводных лодок, телеметрические системы для подземной навигации буровых снарядов и инклинометры, чувствительные элементы для инерциальных систем, приборы точной электромеханики.

Институт динамично развивается, действует эффективная система подготовки и ротации специалистов, сформировано мощное современное производство, постоянно проводятся техническое перевооружение и реконструкция.

В. Г. Пешехонов ведет большую научно-организационную и педагогическую работу. Он член бюро Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, председатель Научного совета РАН по проблемам транспорта, член бюро Научного совета РАН по проблеме "Координатно-временное и навигационное обеспечение", член бюро и председатель секции Научного совета РАН по управлению движением и навигации, член бюро и руководитель Санкт-Петербургской территориальной группы Российского национального комитета по автоматическому управлению, член президиума и председатель секции совета по премиям Правительства РФ в области науки и техники, член президиума и председатель секции научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве РФ, член президиума и председатель секции научно-технического совета при Правительстве Санкт-Петербурга.

В. Г. Пешехонов является заведующим базовой кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, главным редактором журнала "Гироскопия и навигация", председателем Программного и Организационного комитетов ряда научных конференций, в том числе ежегодной Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам и конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов и систем Н. Н. Острякова, председателем президиума Российской мультikonференции по проблемам управления, президентом международной общественной организации "Академия навигации и управления движением", объединяющей более 380 известных ученых из России, Украины, США, Канады, Германии, Франции и ряда других стран.

Редакционный совет, редакционная коллегия и коллектив редакции журнала сердечно поздравляют Владимира Тригорьевича с юбилеем и желают ему здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов на благо российской науки и техники.



Поздравляем юбиляра!

Заслуженному деятелю науки и техники РФ, заведующему кафедрой технической кибернетики, доктору технических наук, профессору, известному ученому в области теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами, члену редколлегии журнала "Мехатроника, автоматизация, управление"

**Барый Галеевич
ИЛЬЯСОВУ**

исполнилось 70 лет.

Б. Г. Ильясов является одним из создателей ведущей отечественной научной школы в области интеллектуальных систем управления на основе современных информационных технологий. Он является автором более 450 научных трудов, в которых заложены основы современных направлений развития теории и практики информационно-управляющих систем. Под его руководством защищены 14 докторских и более 50 кандидатских диссертаций.

Талантливый ученый и организатор науки, высококвалифицированный специалист, чуткий, отзывчивый и обаятельный человек, Барый Галеевич пользуется глубоким уважением учеников, коллег, товарищей.

*Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, большого счастья, новых творческих успехов!
Редсовет, редколлегия и редакция журнала.*

CONTENTS

Teryaev E. D., Filimonov N. B., Petrin K. V. *Mechatronics as Computer Paradigm of Technical Cybernetics Developments*. 2

The modern interpretations of the notion and evolution of representations on the subject area of mechatronics are analyzed. It's shown that one may regard mechatronics as computer paradigm of technical cybernetics development.

Keywords: mechatronics, notion and subject area, paradigms in the science, evolution of cybernetics, informatics, technical cybernetics.

Sokolov B. V., Yusupov R. M. *The Role and Place of Neocybernetics in Modern Structure of System Knowledge*. 11

The main objects of the paper are neocybernetics and its interrelations with informatics and general system theory. Neocybernetics (second-order cybernetics, cybernetics of XXI century) is an inter-disciplinary science oriented an analysis and synthesis of intellectual control systems for complex arbitrary objects. In other words neocybernetics is used to decision of modern complexity management problems. Recently authors have got new interesting science results in complex technical systems (CTS) structure dynamic control (SDC) theory which is the main line of investigation in neocybernetics. For example, generalized procedure of CTS SDC problem decision is proposed in the paper.

Keywords: informatics and general system theory, neocybernetics, complexity management, complex technical object structure dynamic control theory.

Kuznetsov N. A., Grechishkina N. A. *Nanotechnology Control Systems* 22

The basic object of research of authors in present article is to make an overview of dataware methods, decision making methods, methods for limited resources control, and methods for analysis of stability of distributed nanotechnology control systems.

Keywords: nanotechnology, control, dataware.

Kaliaev I. A., Kapustjan S. G. *Problems of Group Control by Robots*. 33

In work problems of group control by robots in various conditions are considered. The most difficult the given problem is at functioning groups of robots in conditions of dynamically changing, not determined situations. Formal statement of a task of group management by robots is given. For the decision of the given task is suggested the method of collective control which essence consists that each robot of group independently defines the next actions directed on achievement of the collective purpose by best in the current situation in the image. The principles of collective interaction used by collectives of people are put in a basis of the suggested approach, carrying out the general work without the head or the commander.

Keywords: group of robots, group management, a task of the group control, not determined situation, a method of collective control, iterative procedure, optimization of collective actions, gregarious strategy of control.

Krasnova S. A., Utkin V. A., Utkin A. V. *Block Control Synthesis for Mechanical Systems under Uncertainties* . 41

The paper presents a block control design for position trajectory tracking of manipulator under model uncertainties and external disturbances. In configuration space two problems are solved. Under conditions that the uncertainties are smooth functions the tracking problem may be solved exponentially with generalized coordinates are measured only. If uncertainties belong to class of non-smooth functions the tracking problem may be solved with given accuracy with generalized coordinates and actuators torque are measured. The information support problems are solved with the help of state observers with minimal necessary set of sensors. The comparison characteristics of designed synthesis procedures and simulation results are presented.

Keywords: mechanical systems, block control method, sliding mode, state observer, external disturbances.

Yakovis L. M., Sporyagin K. V. *Typical Controllers Adjustment for Multivariable Objects of Industrial Automation* 55

Multivariable objects of industrial automation are characterized by interconnections of a number of indexes, different response times and time delays to control actions by channels. Typical controllers adjustment methods for such objects are presented in the article. These methods are based on automatic control theory and computer simulation.

Keywords: typical controllers, multivariable objects, response time, time delay, simulation.

Leonov G. A., Kondratjeva N. V. *Electromechanical and Mathematical Models of Synchronous Machines* . . . 64

Two electromechanical models of synchronous machines are considered. For the models differential equations with angular coordinates are obtained.

Keywords: synchronous machine, rotor, stator, exciting winding, damper winding, stability, rotating magnetic field, salient-pole rotor.

Evstifeev M. I. *Micromechanical Gyros Design Problems and Development Experience* 70

Main phases of domestic micromechanical gyros development are presented. The history of their creation is revealed beginning from the first devices design up to testing of gyros and systems developed at CSRI Elektropribor. Design problems are analyzed with due account of specific materials, technologies and constructive solutions.

Keywords: micromechanical gyros, silicon.

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 *Г. Д. Назарьева.*

Сдано в набор 03.04.2009. Подписано в печать 18.05.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,71. Заказ 454. 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