ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 1 (106)
январь
2010

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.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕХАТРОНИКИ

Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы . . . 2

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Филаретов В. Ф., Губанков А. С. Синтез адаптивных систем управления, настраивающихся по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами . . . 15

Бронников А. М., Буков В. Н. Децентрализованное адаптивное управление с идентификацией и модельной координацией в многосвязных системах . . . 22

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Терехов В. А., Никонов А. Н. Синтез нейрорегулятора нелинейных динамических объектов на основе одной модели бифуркации . . . 31

Нечаев Ю. И. Информационные технологии и управление в бортовых интеллектуальных системах новых поколений . . . 42

Резчиков А. Ф., Митяшин Н. П., Кузьмиченко Б. М., Рябов О. Н., Карпук Р. В. Многокритериальный выбор оборудования на основе нечеткой меры ценности критериев . . . 54

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Себряков Г. Г. Аппроксимирующие модели деятельности человека-оператора в полуавтоматических системах управления динамическими объектами . . . 59

Фархатдинов И. Г., Подураев Ю. В., Ю Дж.-Х. Экспериментальное исследование позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления в системах дистанционного управления мобильными роботами . . . 70

Contents . . . 79

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

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
http://novtex.ru/mech, e-mail: mech@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2010

УДК 621.865.8; 382.049.77(075.8)

Е. Д. Теряев, чл.-корр. РАН, проф.,
Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф.
ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН,
МИРЭА (ГТУ), Москва
mech@novtex.ru

Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы

Анализируется современное состояние, актуальные проблемы и перспективы развития наномехатроники — специального раздела мехатроники, порожденного ее конвергенцией с нанотехнологиями и призванного заниматься теорией и практикой наномехатронных систем.

Ключевые слова: *мехатроника, нанотехнологии, конвергенция мехатроники с нанотехнологиями, мифы и реалии наномехатроники.*

50-летию нанотехнологий посвящается*

"Если бы меня спросили, какая область науки может обеспечить нам прорыв в будущее, я бы назвал нанотехнологии".
Ричард Ф. Фейнман

"Замены нанотехнологиям не предвидится".
Эрик К. Дрекслер

"Нанотехнологии произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую произвели компьютеры в манипулировании информацией".
Ральф С. Меркле

Введение

Еще несколько лет назад мало кто задумывался над приставкой "нано" (от греч. nannos — гном), обозначающей одну миллиардную долю (10^{-9}) исходной единицы. Однако уже сейчас она прочно вошла в современный научно-технический обиход и стала наиболее продуктивным элементом словообразования, а в ближайшем будущем (согласно прогнозам ведущих международных экспертов) вторгнется в повседневную жизнь каждого человека, причем не модным брендом, а "новой реальностью", "последним чудом цивилизации", "самыми высокими технологиями" — нанотехнологиями, обладающими гигантским потенциалом, открывающими практически ничем не ограниченные возможности и горизонты, способными "построить мир заново", в корне изменив как среду нашего обитания, так и привычный нам образ жизни [1—3]. Как заметил один из создателей термоядерной бомбы Теллер (E. Teller), "тот, кто раньше овладеет нанотехнологией, займет ведущее место в техносфере следующего столетия". Поднявшаяся волна ажиотажа вокруг нанотехнологий существенно обогатила эту приставку, придав ей магическую силу: "нано" a priori стала подразумевать имидж наукоемкого, передового, причем с гарантированно высокими показателями эффективности и качества.

Грядущая научно-техническая революция, связанная со становлением и бурным развитием нанотехнологий, коснулась практически всех сфер научно-исследовательской деятельности и породила целый ряд так называемых нанонаук [4—7]: нанофизику (включая наномеханику и наноэлектронику), нанохимию, нанобиологию и наноинформатику (именуемую также квантовой информатикой), являющихся новыми и наиболее динамично развивающимися специальными разделами соответствующих традиционных наук, ориентированными на изучение нанообъектов — наноразмерных (наномасштабных, наноскопических) объектов с размерами в диапазоне от единиц до сотен нанометров.

Наряду с данными науками нанореволюция затронула и *мехатронику* [8] — одну из самых молодых технических наук XX века, *связанную с компьютерным управлением в технических системах* и, фактически, являющуюся компьютерной парадигмой развития технической кибернетики [9]. В специальной научно-технической литературе и в сети Интернет появился термин "*наномехатроника*", который уже включен в словарь Международной федерации содействия наукам о машинах и механизмах (Online IFT of MM Dictionaries) для обозначения раздела мехатроники, относящегося к системам, соизмеримым с молекулами. При этом следует отметить, что:

- бельгийский международный институт информатики (ICST) объявил наномехатронику одним из перспективных направлений развития коммуникационных технологий в условиях их слияния с нанотехнологиями;

* "Начало" эры нанотехнологий ученые связывают со знаменитой лекцией-предвидением "Как много места там, внизу", прочитанной **29 декабря 1959 г**. перед Американским физическим обществом выдающимся физиком-теоретиком XX века, "крестным отцом нанотехнологий", Нобелевским лауреатом, профессором Р. Фейнманом (R. Ph. Feynman).

- Софийский технический университет ввел наномехатронику в качестве самостоятельной дисциплины в учебный план подготовки магистров по мехатронным системам;
- всемирный Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) уже несколько лет проводит международные симпозиумы "Micro-Nano Mechatronics and Human Science";
- международный журнал "International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems" открыл рубрику "Micro and Nanomechatronics Systems for Manufaturing";
- немецкое издательство "Springer" начало выпускать международный журнал "Journal of Micro-Nano Mechatronics";
- американский университет Юта (University of Utah) организовал свой тематический веб-сайт "The World of Nanomechatronics".

Хотя "нанонауки" сегодня "на слуху" и покоряют все новые умы, не все представляют, с чем же эти науки имеют дело. Это касается, прежде всего, наномехатроники, поскольку, с одной стороны, бытует мнение, что эта "фантастическая" наука весьма привлекательна, но далека от практики, а с другой — категорически утверждается [10], что "в ближайшее время мехатроника должна быть наномехатроникой".

К сожалению, приходится констатировать, что в современных представлениях о наномехатронике часто распространяется множество неточных и ошибочных сведений, которые привели к появлению ряда заблуждений, а также к возникновению и укоренению так называемых "наномифов", превратно или неправильно трактующих грядущую конвергенцию мехатроники с нанотехнологиями [11]. Эти заблуждения вызваны, как правило, непониманием реального смысла термина "наномехатроника" (см. например, [10, 12]), либо преувеличением или ошибочным принятием на веру кажущихся на первый взгляд правдоподобными фактов или умозаключений футурологических прогнозов нанореволюции. Целью данной статьи является попытка продемонстрировать специфические особенности наномехатроники, а также проанализировать ее современное состояние, проблемы и перспективы развития.

Наномехатроника как результат конвергенции мехатроники с нанотехнологиями

Одной из основополагающих тенденций современного развития мехатроники является внедрение технологий миниатюризации, позволяющих создавать мехатронные системы с уникальными техническими и технологическими характеристиками: минимальными массогабаритными показателями, низким потреблением энергии и ресурсов, малым износом, максимальной чувствительностью, повышенными показателями точности и быстродействия, надежности и безопасности функционирования. Помимо соображений экономии материальных и энергетических затрат, при переходе к следующему этапу миниатюризации огромное значение приобретает массовое производство миниатюрных изделий, которые становятся всепроникающими элементами профессиональной и личной жизни человека (компьютинга, телекоммуникаций, мониторинга физиологического состояния и т. д.).

Границы современной мехатроники охватывают все масштабы систем — от "макро" (размеры более 1 мм) до "микро" (размеры от 1 мк до 1 мм). Используемые при этом микротехнологии определяют лицо нынешней цивилизации и позволяют создавать новое поколение мехатронных систем различного назначения, в которых наиболее полно реализуется принцип синергетической интеграции механических, электронных и компьютерных компонентов в едином конструктивном исполнении для достижения цели управления [8]. Однако уже сегодня ясно, что в микротехнологиях в ближайшем будущем возникнут определенные барьеры, преодолеть которые на пути дальнейшей миниатюризации мехатронных систем позволят нанотехнологиии. Согласно оценкам выдающегося футуролога Курцвейла (R. Kurzweil), каждое десятилетие усредненный показатель прецизионности возрастает в 5,6 раза, так что в 20-х годах XXI столетия все ключевые технологии станут "нано-".

Термин "*нанотехнология*" (nanotechnology), введенный в научно-технический обиход в 70—80-х гг. прошлого века японским профессором Танигучи (N. Taniguchi) [13] и американским студентом Дрекслером (E. K. Drexler) [14], в настоящее время означает [15, 16] *создание и модификацию производственных процессов, материалов и систем на основе контролируемого манипулирования отдельными атомами, молекулами и надмолекулярными образованиями.*

Нанотехнологии охватывают процессы, материалы и системы. Нанопроцессы — это локальные атомно-молекулярные взаимодействия, включающие атомную сборку молекул и локальную стимуляцию химических реакций на молекулярном уровне. Наноматериалы — это материалы, содержащие наноструктурные элементы. Наносистемы — это полностью или частично созданные функционально законченные системы на основе наноматериалов и нанотехнологий.

Человек всегда стремится к большему, желая не просто повторить изобретения природы, но и превзойти их. До сих пор ему это не удавалось, и лишь с освоением нанотехнологий он может получить реальные шансы на воплощение своей давней "бредовой мечты" — присвоение функции Творца Вселенной, связанной с возможностью по своей воле создавать новый мир на основе биоорганики,

соединившей физику и молекулярную биологию. Действительно, все объекты на Земле, включая природные материалы и системы, состоят из молекул, и, следовательно, природа "программирует" основные характеристики веществ и явлений на молекулярном, наномасштабном уровне. Именно в связи с этим нанотехнологии сулят человечеству поистине фантастические перспективы "портала в новый мир", призванного обеспечить управляемое построение принципиально новой материи (как "мертвой", так и "живой") с любыми наперед заданными свойствами, причем из самого простого подручного материала, без отходов и с минимальными энергетическими затратами.

Гигантский потенциал и фантастические перспективы нанотехнологий связывают, прежде всего, с экзотическими характеристиками и уникальными свойствами наномира, которые определяются такими сложными физическими наноскопическими явлениями, как корпускулярно-волновой дуализм и квантово-механические эффекты. При переходе к нанометровому диапазону у материалов и систем возникает совокупность новых, ранее неизвестных механических, химических, электрофизических, оптических, магнитных и других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Микрореволюция привела к появлению *микромехатронных систем* и породила *микромехатронику* — специальный раздел мехатроники, занимающийся компьютерным управлением микропроцессами. Очевидно, что грядущая конвергенция мехатроники с нанотехнологиями должна естественным образом привести к появлению *наномехатронных систем* и породить новый раздел мехатроники — *наномехатронику, призванную заниматься теорией и практикой наномехатронных систем и проблемами управления нанопроцессами*.

Фактически, **наномехатроника — это "молекулярная мехатроника", а наномехатронные системы — это "молекулярные машины"**, идея создания которых на основе "атомно-молекулярной сборки", именуемой наномехатронным подходом или молекулярным производством, предложена Фейнманом [17] и получила широкое развитие в работах Дрекслера [18—20] и его последователей — Меркле (R. CC. Merkle), Фрейтаса (R. A. Freitas) и др.

Поскольку наномехатронные системы представляют собой атомно-молекулярные образования, то они обладают определенной спецификой, обусловленной особенностями наномасштабной физики [21]:

- сверхсложностью, обусловленной астрономическим числом элементов (1 г наносистемы может содержать 10^{19} штук деталей, которые могут совершать более 10^{12} циклических перемещений в секунду);
- потребностью в энергии для функционирования и в каналах информационной связи с внешним миром;
- подверженностью тепловым колебаниям, а также воздействиям физических полей и излучений;
- функционированием посредством химических реакций, которые подразумевают электронные и/или ядерные перестановки;
- возможностью изменять положение своих элементов относительно друг друга в результате воздействия внешних факторов;
- информационной неопределенностью состояния вследствие корпускулярно-волнового дуализма в наномире.

Как известно [8], мехатронные системы интегрируют в единой конструктивной компановке с использованием технологий максимального уплотнения механическую, энергетическую и управляющую части. Такая интеграция предполагает миниатюризацию основных элементов системы, выполняющих функции взаимодействия с внешней средой — чувствительных, исполнительных и информационно-управляющих. При этом отличительным признаком мехатронных систем является наличие средств интеллектуальной поддержки задач обработки информации и управления.

Поскольку наномехатронные системы наиболее полно реализуют замкнутую через внешнюю среду триаду "сенсоры—процессоры—актюаторы", сочетая в себе максимально возможные степень интеграции и уровень интеллектуализации, то они являются последней парадигмой развития мехатронных систем.

Восходящее нанопризводство

Нанопроизводство — это производство наноразмерных объектов с наперед заданной атомарно-молекулярной структурой, которое может строиться на двух *нанотехнологических принципах*, известных как технологии "сверху-вниз" (top-down) и "снизу-вверх" (bottom-up).

Технология "*сверху-вниз*" является "прямой" и основана на последовательном многократном уменьшении размеров объектов "высшего порядка" — макро- или микрообъектов — путем механической или иной обработки до требуемых нанометровых размеров. Технология "*снизу-вверх*" является "обратной" и основана на построении из объектов "низшего порядка" — отдельных атомов и молекул — путем их группировки требуемых наноразмерных объектов.

Нанопроизводство, реализующее технологию "сверху-вниз", именуется *нисходящим*, а "снизу-вверх" — *восходящим*. Процесс массового производства наноизделий может сочетать в себе оба нанотехнологических принципа, однако, по мнению разработчиков американской Дорожной карты в об-

ласти нанотехнологий "Производственные наносистемы. Обзор технологических перспектив" [22], ключевым направлением дальнейшего развития нанопроизводства должны стать так называемые технологии атомарной точности, реализующие принцип "снизу-вверх", "по которому Великим Творцом создана вся Вселенная включая нас самих (от яйцеклетки к Венцу)". Поскольку свойства наноструктур определяются не только природой входящих в них атомов и молекул, но и архитектурой их группировки, то в рамках восходящего нанопроизводства возможны две концепции построения нанообъектов: первая — *перестройка имеющихся наноструктур* (например, перестроив порядок атомов угля, можно изготовить алмаз), вторая — *сборка большей наноструктуры из меньшей* (например, используя молекулы воды и углекислого газа, можно изготовить сахар или крахмал).

Заметим, что впервые идея предельной миниатюризациии технических систем путем построения их не из куска вещества, а непосредственно из атомов и молекул, была высказана в 1959 г. Фейнманом. Он предложил идти не "в ширь", а "в глубь" материи путем многоступенчатого проникновения в наномир: макросистема воздействует в пределах своего масштаба точности на микросистему, которая, в свою очередь, воздействует в пределах своего масштаба точности на наносистему. Последняя представляет собой управляемую молекулу, которая, воздействуя в пределах своей точности на атомы, осуществляет механическим путем управляемый химический синтез молекул. В 1977 г. Дрекслер указал на бесперспективность данной концепции, считая, что никакая обработка не сможет отсечь от куска вещества лишнее и оставить нужную молекулярную цепочку. Он предложил другой — прямой путь проникновения в наномир: сначала на молекулярном уровне строятся довольно простые наносистемы, подобные наноструктурам живой материи, отличающимся от неживой способностью к самосборке и самоорганизации, а уже затем на их основе строятся более сложные наносистемы.

Для реализации восходящего нанопроизводства необходимо иметь проект наносборки, наносырье и нанооборудование.

Проект наносборки — это поатомное описание производимого нанообъекта, включающее описание как взаимного расположения атомов и их типов, так и химических связей между ними.

Наносырье — это исходные "мелкие" (атомы и молекулы) и "крупные" (нанокластеры) сборочные единицы (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Атомы — наименьшие частицы химического элемента, являющиеся носителями его свойств. Всего существует немногим более 100 атомов, причем самый легкий — атом водорода с одним электроном, а самый тяжелый элемент, встречающийся в природе, — атом урана с 92 электронами. Размер атомов приблизительно одинаков и колеблется в диапазоне 0,1...0,22 нм.

Молекулы — наименьшие устойчивые частицы вещества, обладающие всеми его химическими свойствами. Они состоят из атомов, скрепляемых в особом порядке химическими связями. Самые простые молекулы содержат всего два или три атома, самые крупные неорганические молекулы могут содержать тысячи атомов, а органические молекулы — миллионы атомов. Размер молекулы, состоящей из более 30 атомов, превышает 1 нм. Существует несколько миллионов молекул, и каждый год открывают либо синтезируют сотни новых молекул.

Нанокластеры (мегаатомы) — это разновидность наночастиц упорядоченного строения, состоящая из сотен или тысяч атомов. Нанокластеры имеют размеры порядка десятков нм. Особую роль строительных блоков играют специальные углеродные нанокластеры с каркасной структурой — фуллерены (выпуклые многогранные нанообразования) и нанотрубки (протяженные цилиндрические нанообразования) [23].

Нанооборудование — это нанотехнологические системы, именуемые *наноассемблерами* (сборщики атомов, Atomic Assembler), предназначенные для реализации наносборочных процессов на атомно-молекулярном уровне. Различают атомные и молекулярные наноассемблеры, отвечающие соответственно "физической" (атомарной) и "химической" (молекулярной) парадигмам восходящего нанопроизводства. Молекулярные наноассемблеры оказываются более предпочтительными для наносборки, поскольку молекулы: являются более стабильными образованиями; обладают четкими формами; имеют необходимые для манипуляции свойства; они могут быть соединены извне или собираться самостоятельно для образования наноструктур. Нанопроизводство и нанотехнологии, основанные на молекулярных ассемблерах, часто именуют соответственно *молекулярным производством* и *молекулярными технологиями*. При этом следует заметить, что молекулярная нанотехнология не означает создание технологий, которые могут быть встроены в продукты, а означает создание всего продукта через молекулярное производство.

В развитии восходящего нанопроизводства выделяют два возможных направления, различающихся используемыми типами наноассемблеров для *управляемого механосинтеза* — химического синтеза атомно-молекулярных структур, управляемого механически путем позиционирования реагирующих веществ до тех пор, пока не вступят в действие соответствующие химические связи. Первое направление основано на использовании в качестве наноассемблеров сканирующих зондов, а второе — нанороботов.

Для организации массовой сборки нанообъектов нанопроизводство должно быть автоматизировано и поставлено на поток. Существуют две парадигмы автоматизации восходящего нанопроизводства:

- *автоматизированная наносборка* на основе управляемого оператором-технологом механосинтеза *с использованием сканирующих зондов;*
- *автоматизированная наносборка* на основе управляемого оператором-технологом механосинтеза *с использованием нанороботов*.

Особенности автоматизированной наносборки на основе сканирующих зондов

Первое поколение наноассемблеров, позволяющих на основе законов квантовой физики измерять, "видеть" и манипулировать нанообъектами, появилось в 1980-х гг. в виде специальных нанотехнологических установок, в которых методами сканирующей зондовой микроскопии проводятся нанотехнологические операции на атомарном уровне [24]. К данным установкам относятся туннельные, атомно-силовые, магнитно-силовые, электросиловые и оптические ближнего поля сканирующие микроскопы.

Несмотря на многообразие видов и применений, существующие сканирующие зондовые микроскопы имеют схожие принципы работы. Основными общими их узлами являются: зонд в виде металлической микроиглы, сканирующий механизм и нанореактор в виде образования между наконечником зонда и поверхностью обрабатываемого образца. Нанореактор обеспечивает целенаправленные межатомно-молекулярные связи вещества "зонд—подложка" и инжектируемой в его объем технологической среды (газообразной или жидкой) для формирования требуемых наноструктур. Сканирующий механизм обеспечивает подвод зонда к поверхности образца и его пространственное прецизионное позиционирование. Зонд в процессе сканирования "ощупывает" поверхность образца, обеспечивая ее "визуализацию" с высоким нано- и субнанометровым разрешением (до атомарного уровня по вертикали и существенно выше по горизонтали). Важнейшие фазы нанопроцессов связаны с фиксацией (локализацией) и активацией (изменением структуры) атомов и молекул в неоднородном электрическом поле между зондом и подложкой, которые могут быть обеспечены механическими, электрическими, тепловыми, оптическими, ультразвуковыми, электромагнитными воздействиями и их комбинацией. Следует заметить, что сканирующие микроскопы позволяют изучать нанообъекты не только в вакууме, но и в различных газах и жидкостях.

В современной наноинженерии основным технологическим инструментом наноскопического анализа и синтеза являются сканирующие туннельный (Scanning Tunneling Microscope — STM) и атомно-силовой (Atomic-Force Microscope — AFM) микроскопы (рис. 2 [25], см. вторую сторону обложки), различающиеся типами взаимодействия зонда с поверхностью обрабатываемого образца. В процессе сканирования в туннельном микроскопе измеряется туннельный ток, а в атомно-силовом микроскопе — сила взаимодействия между зондом и образцом. На основе данных измерений компьютер микроскопа строит трехмерное графическое изображение, воспроизводящее рельеф поверхности образца с рекордным вертикальным (0,01...0,05 нм) и горизонтальным (0,1 нм) разрешениями. Применение туннельного микроскопа, в отличие от атомно-силового микроскопа, ограничивается лишь проводящими образцами.

Методы зондовой микроскопии позволяют реализовать основные функции наносборки — манипуляции отдельными атомами и молекулам (рис. 3, см. вторую сторону обложки: *a* — схематическое изображение цепочки из пяти атомов серебра и еще трех отдельных атомов серебра на поверхности NiAl(110); *b* и *c* — полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа изображение этой цепочки до и после добавления к ней одного атома серебра). При этом используются два способа манипуляции атомами с помощью зонда сканирующего микроскопа — горизонтальный (параллельный) и вертикальный (перпендикулярный). В процессе вертикальной манипуляции, в отличие от горизонтальной, после захвата иглой зонда нужный атом отрывается от поверхности, поднимается на несколько десятых долей нанометра, переносится в нужную позицию и "сбрасывается". Данный процесс требует бóльших усилий, чем "перекатывание" атома по поверхности, но зато он не зависит от встречающихся на ней препятствий в виде ступеней, ям, адсорбированных атомов и т. п.

Автоматизация зондовой наносборки обеспечивается мехатронной двухконтурной системой управления, реализующей двухступенчатое (грубое и точное) позиционирование нанозонда. Система включает: трехкоординатный привод зонда, обеспечивающий его грубое позиционирование; зондовый датчик; трехкоординатный сканирующий пьезоактюатор стола для размещения обрабатываемого образца, обеспечивающий тонкое позиционирование зонда. В системе достигается точность позиционирования иглы зонда относительно образца в сотые доли нанометра на десятки микрометров по горизонтали и на единицы микрометров — по вертикали. Управление процессом сканирования, а также визуализация и интерпретация результатов осуществляются с помощью персонального компьютера.

Безусловно, в настоящее время сканирующая зондовая микроскопия по точности обнаружения

и контроля нанообъектов не имеет себе равных. Однако с ее помощью практически невозможно создать даже самые простейшие трехмерные наноструктуры, а удается создавать лишь плоские наноструктуры, состоящие из десятка атомов, причем с неизбежно низкой производительностью и высокой дефектностью. Методы сканирующей зондовой микроскопии являются методами индивидуальной обработки. Обратимся, например, к сканирующему туннельному микроскопу. Объем атома примерно равен 10^{-24}см^3 и, следовательно, он занимает площадь порядка 10^{-16}см^2. Очевидно, что при непрерывной работе микроскопа в течение 100 часов для полного заполнения его операционного поля размером 1 см^2 необходимо за одну секунду обеспечить "высадку" на поверхность обрабатываемого образца в строго индивидуальном порядке 10^{16} атомов, на операционное поле в 1 мм^2 — 10^8 атомов, а на операционное поле в 1 мкм^2 — 10^2 атомов, что абсолютно нереально.

Таким образом, зондовая наносборка демонстрирует лишь принципиальную возможность манипуляции нанообъектами и никак не может считаться технологией, пригодной для массового производства наносруктур. Неслучайно в нанотехнологической Дорожной карте США [22, с. 156] особо подчеркивается, что "к текущему моменту ни один из подходов сканирующего зондирования не достиг уровня, достаточного для его практического применения".

Особенности автоматизированной наносборки на основе нанороботов

Второе поколение наноассемблеров (наносборщиков) в виде специальных наноразмерных систем — программируемых нанороботов, способных самостоятельно или по приказам "свыше" (с использованием акустических, электромагнитных, световых сигналов) целенаправленно манипулировать отдельными атомами или молекулами, — было предложено в 1980 гг. в работах Дрекслера. Такие нанороботы призваны по заданной программе собирать из произвольного подручного наносырья любые нанообъекты, причем из-за сверхмалых размеров они смогут работать с частотой до миллиона операций в секунду. За счет этой скорости и параллельной работы миллионов нанороботов практически любой материальный макрообъект можно будет произвести быстро и недорого в неограниченных количествах. Наноассемблеры могут работать в паре с *нанодизассемблерами* — нанороботами, способными по заданной программе разбирать любые объекты на атомы и молекулы для получения необходимого наносырья. Наноассемблеры и нанодизассемблеры — это, фактически, "Адам и Ева" автоматизированного восходящего нанопроизводства.

Следует заметить, что в нанороботах в качестве своеобразного молекулярного позиционирующего устройства для атомно-молекулярной сборки, являющегося аналогом руки сборочного робота, наиболее часто используются альтернативные варианты: двойной трипод, "рука" Дрекслера и платформа Стюарта.

Самой важной особенностью нанороботов-сборщиков является реализованная в них функция самосборки, т. е. возможность запрограммировать их как *репликатор* — систему, способную к "размножению" (самовоспроизведению, самокопированию). Природа использует репликаторы повсеместно — как в клеточной машинерии клетки, так и при репликации живых организмов. Например, бактерии вполне целенаправленно пытаются "разбирать все вокруг себя на атомы" и создавать из этого свои копии, причем они, используя репликативные свойства ДНК, способны размножаться за считанные часы от нескольких особей до миллионов.

Следует особо подчеркнуть, что нанопроизводство, не использующее самореплицирующиеся структуры, фактически ограничится созданием лишь микроскопических объектов. Для создания макроскопических объектов необходима технология создания и управления реплицирующимися структурами. Фундамент теории таких структур был заложен в теории самовоспроизводящихся автоматов фон Неймана (J. von Neumann) [26]. Опираясь на фон неймановскую модель, можно сделать интересные выводы о самореплицирующихся структурах. Если представить себе репликатор как "конструктор", то при изготовлении третьего репликатора двумя другими процесс репликации будет проходить в два раза быстрее. Увеличивая число репликаторов и специализируя их, мы будем получать сложную систему, скорость репликации которой будет увеличиваться по экспоненциальному закону.

Репликаторы могут быть простыми и сложными. Например, простейший репликатор, предложенный Меркле и представляющий собой управляемый наноманипулятор со встроенным нанокомпьютером, состоит из 10^7 атомов. Если такой репликатор работает со скоростью 10^6 шагов в секунду и при наносборке для требуемой манипуляции атомом ему необходимо сделать 10^4 шагов, то для сборки своей копии он должен сделать 10^{11} шагов, что займет 10^5 секунд, или около 28 часов. При изготовлении макроскопических объектов данному репликатору придется выполнять уже 10^{20} операций в секунду. Для этого необходима популяция репликаторов в количестве 10^{18} штук (каждый из них в отдельности работает со скоростью 10^2 шагов в секунду). Следовательно, для производства такого числа репликаторов потребуется 60 генераций, что займет

около 69 дней. Заметим, что исследования NASA показали, что репликатор можно построить, причем он будет конструктивно не сложнее, чем процессор Pentium IV.

Итак, для обеспечения управляемого механосинтеза необходимо создание универсального нанробота-сборщика, управляемого макрокомпьютером либо встроенным нанокомпьютером. Именно с момента создания данного управляемого "наносборщика" нанотехнологию можно будет считать окончательно получившей прикладную основу. В принципе, самый первый нанробот можно будет собрать с помощью сканирующего туннельного микроскопа, и, если в него загрузить программу самовоспроизводства, он сможет создавать подобных себе нанроботов.

В американском Институте молекулярного производства (IMM) разработаны дизайны ряда подобных "наносборщиков". Расчеты доказывают их осуществимость, однако их создание планируется не ранее 2020 г. На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) представлена виртуальная модель наноманипулятора (виды спереди, сбоку и пространственный) на базе двойного трипода, состоящая из 2596 атомов. Наноманипулятор имеет шесть степеней свободы и управляется храповиками, приводимыми в действие давлением инертного газа. В его конструкции задействованы следующие атомы, окрашенные разными цветами: азота (синий), углерода (серый), кремния (желтый), кислорода (красный) и водорода (белый).

Отметим, что если наносборка осуществляется не отдельными нанроботами, а в рамках единой производственной системы жестко зафиксированных нанроботов, то речь идет о *нанофабрике* — самой сложной производственной наносистеме, предназначенной для создания по заданной программе различных макрообъектов. Именно нанофабрикам — "машинам изобилия" — отводится ведущая роль в грядущей нанореволюции, поскольку столь мощного орудия производства у человечества еще не было.

Основой работы нанофабрики является множество *фабрикаторов* — управляемых устройств, способных комбинировать атомы, создавая между ними химические связи. Готовая нанофабрика состоит из триллионов отдельных фабрикаторов разных уровней. Сначала фабрикаторы первого уровня создают из атомов элементарные блоки, затем фабрикаторы второго уровня соединяют их друг с другом в более крупные блоки, которые, в свою очередь, соединят между собой фабрикаторы третьего уровня и т. д. Этот процесс повторяется до тех пор, пока необходимый макрообъект не будет собран полностью. Подобная технология "производственного роста" предусмотрена и для сборки нанофабрик макроскопического уровня.

С помощью нанроботов предполагается строить различные нанофабрики, представляющие собой нечто вроде нанотехнологической "скатерти самобранки", способной практически из любых веществ: земли, химических и бытовых отходов (содержащих в достаточном количестве все химические элементы, входящие в состав производимого объекта) строить все — не только одежду, пищу, лекарства и бытовую технику, но и любые органические живые существа.

На рис. 5 и 6 (см. третью сторону обложки) представлена модель виртуальной автоматизированной молекулярной нанофабрики третьего тысячелетия, разработанной в Институте молекулярного производства Фениксом (Ch. J. Phoenix) [27]. Эту "настольную нанофабрику" с размерами 0,5 × 0,5 × 0,5 м, весом в 60 кг и мощностью около 200 кВт планируется изготовить из алмазоида — материала с прочностью и химической инертностью алмаза. Она способна не только изготавливать макрообъекты (например, объект размером 10 × 10 × 10 см и массой около 4 кг производится примерно за три часа), но и реплицироваться, т. е. размножаться путем создания своей копии.

Если триллион нанроботов собирать последовательно, тратя на сборку одного всего микросекунду, то на всю партию придется убить миллион секунд, т. е. две недели. Именно по этой причине было предложено организовывать нанопроизводство по схеме размножения дрожжевых бактерий: сначала всем миром делается одна универсальная нанофабрика, а затем она настраивается на изготовление себе подобных. Согласно оценкам, за два дня можно создать одну копию нанофабрики Криса, а затем их становится уже 4, 8, 16, 32, 64 и так далее в геометрической прогрессии. В итоге, на 62-й день после начала ее репликации каждого жителя Земли можно будет обеспечить собственной нанофабрикой.

Конечно, восходящее нанопроизводство на основе нанроботов выглядит очень привлекательно и перспективно. Основные его положения представлены в книге Дрекслера "Наносистемы: молекулярные машины, производство и вычисления" [18], равной которой по полноте и глубине изложения до сих пор нет. Однако все это далекое будущее, всего лишь демонстрация предельных теоретических возможностей атомно-молекулярной сборки. В ближайшем же будущем нанопроизводство должно опираться на природные принципы *самосборки* (Self-Assembling) и *самоорганизации* (Self-Organization), связанные с наномасштабным явлением самопроизвольного образования тех или иных наноструктур [28]. Самосборка (самоупорядочение) — это процесс адсорбции и формирования специфического расположения молекул на твердой поверхности. Ее движущей силой является хемосорбция, которая проявляется в высокоэнергетических реак-

циях между адсорбатом и адсорбирующей поверхностью. В отличие от сильного взаимодействия между адсорбируемой молекулой и поверхностью, взаимодействие между самими молекулами остается слабым.

Принцип самосборки заключается в том, что молекулы всегда самопроизвольно стремятся перейти на самый нижний из доступных для них уровень энергии. Следуя данному принципу, для обеспечения управляемого механосинтеза достаточно создание искусственных условий, при которых атомы и молекулы, самоорганизовываясь, будут собираться, а точнее, группироваться в определенные заранее известные наноструктуры.

Первые достижения наномехатроники

Поскольку скорость работы механических компонентов обратно пропорциональна их линейному размеру, то нанопроцессы характеризуются огромным быстродействием. Так, например, в наноразмерных системах частоты могут достигать 10 ГГц, а амплитуда колебаний — лежать в диапазоне пикометров (10^{-12}) или фемтометров (10^{-15}). Если движение "руки" макроскопического робота занимает секунды при киловаттных затратах энергии, то "ручонки" наноробота способны выполнять те же движения за миллиардные доли секунды, затрачивая всего лишь миллиардные доли ватт. Даже такое примитивное изобретение 1830-х гг., как механическая "аналитическая машина" Бэббиджа (Ch. Babbage), продемонстрирует достойную по нынешним меркам производительность, будучи уменьшенной до наномасштабов, поскольку его крохотные рычажки смогут двигаться с терагерцовыми частотами. В своих работах Дрекслер оценил приблизительные возможные параметры основных механических наноустройств и показал, в частности, что молекулярная сборка макрообъекта массой 1 кг возможна всего за 10^4 с с производительностью около 10^6 операций в секунду.

В настоящее время наряду с успехами в области "инкрементных" (нанопримеси и нанодобавки) и "эволюционных" (нанодатчики) нанотехнологий все чаще обсуждаются первые шаги в области "радикальных" нанотехнологий, направленных на разработку, создание и внедрение наномехатронных систем, т. е. наносистем, обладающих сенсорными, процессорными и актюаторными функциями.

Идея первого наноноустройства была предложена еще в 1959 г., однако за полвека никому так и не удалось ни создать подобное устройство, ни опровергнуть возможность его создания. Сегодня за терминами "наномашины" и "нанороботы" стоят лишь теоретические выкладки и экзотические лабораторные исследования. Единственное, о чем можно говорить с практической точки зрения, так это о некоторых, созданных на основе технологий наносборки, компонентах и примитивных прототипах данных наносистем. Здесь следует указать на разработанный в последние годы целый ряд механических элементов, узлов и модулей будущих наномехатронных систем: нанозатвор, способный открываться и закрываться для захвата и высвобождения молекул [29]; наноподшипник из двух совместно вращающихся нанотрубок [30]; нанопружина [31]; нанорычаг [32]; роботизированный рычаг [33]; наноносильщик с двумя "ногами", способный переносить молекулярный груз [34]; нанореечная передача [35]; нанопереключатель (одноатомное реле) [36] и др.

Весьма интересными разработками в области молекулярного синтеза исполнительных элементов наномехатронных систем являются: *наномотор* [37], изготовленный на основе нанотрубки, способный работать на гигагерцовых частотах (ротор длиной 100...300 нм, подшипник диаметром 10...40 нм) и *наноактюатор* [38], способный обратимо раздвигать две углеродные нанотрубки на расстояние 0...150 нм (площадь поперечного сечения нанокристалла 36 нм^2, усилие 2,6 нН, скорость выдвижения >1900 нм /с).

Впечатляют также и первые разработки в области молекулярного синтеза собственно наномехатронных систем. В Университете Райс создан наноавтомобиль [39] шириной 4 нм, который не скользит, а катится по атомам золотой микроскопической "трассы" с помощью световой энергии (рис. 7, см. третью сторону обложки). Он является самой маленькой молекулярной машиной и содержит в своей конструкции: раму в виде большой молекулы из трехсот атомов, две оси из углеродных нанотрубок, четыре шарообразных фуллереновых колеса и автономный нереверсивный мотор. Последний представляет собой установленную в центре рамы крестообразную лопасть, которая, вращаясь, отталкивает ее от "трассы". Здесь используется эффект преобразования поглощенной энергии кванта света в энергию механического движения. Если припарковать 25 тысяч таких машин колесо к колесу, то все они смогут уместиться на ребре листка бумаги. Следует заметить, что на создание данного наноавтомобиля ушло почти восемь лет. Наряду с данной разработкой следует указать и на созданный в сингапурском Институте исследования и разработки материалов молекулярный механизм размером 1,2 нм, вращением которого можно уже управлять.

Несмотря на первые успехи в области наносборки молекулярных машин, говорить о создании наномехатронных систем еще рано: они пока пребывают на стадиях концептуальной разработки либо компьютерного моделирования. В настоящее время с помощью компьютерных программ моделируются наносистемы и их элементы, содержащие десятки

тысяч атомов. Наиболее интересные проекты компьютерных моделей молекулярных механических элементов будущих нанороботов разрабатываются в Институте молекулярного производства. В этих проектах главное внимание уделяется "техногенным" наномеханизмам, созданным по типу обычных машин, поскольку нет смысла отказываться от богатейшего арсенала идей, накопленных долгим развитием макротехнологии. Некоторые модели данных проектов представлены на рис. 8 (см. четвертую сторону обложки). Здесь у шестеренок, имеющих характерную частоту вращения в несколько десятков гигагерц, валами являются углеродные нанотрубки, а зубцами — молекулы бензола. Важно отметить, что данные воображаемые наномеханизмы чрезвычайно прочны, быстры и малы — по своим размерам значительно меньше биологических клеток.

Нанотехнологический бум как стимул развития наномехатроники

Столь многообещающая область современной науки и техники, как нанотехнологии, не может не вызывать общественной реакции, порождая многочисленные дискуссии по поводу возможных ее перспектив и скрытых опасностей. Неслучайно в научном сообществе широко распространено критическое отношение к нанотехнологиям. Известный химик Е. А. Гудилин весьма настороженно заявляет, что "пока не ясно, являемся ли мы свидетелями рождения новой области науки или же наблюдаем одну из наиболее масштабных в истории науки спекуляций". Президент Российского нанотехнологического общества Ю. Д. Третьяков вынес вопрос в название своего доклада: "Нанотехнологии — благо, блеф или грядущая катастрофа?", на который видный ученый Г. Г. Малинецкий сразу дал простой ответ: "Нанотехнологическая инициатива — блеф, очередной способ "освоить государственные деньги".

Нанотехнологии вызывают разное к себе отношение: с восхищением и надеждой, с возмущением и насмешкой, с опаской и тревогой. Сторонники первого реально видят перспективы исследований, способных помочь человеку. Сторонники второго полагают, что за наукообразной риторикой стоит лишь стремление получить дополнительный доступ к бюджетному финансированию, поскольку приставка "нано" сегодня самая "грантообразующая" во всем мире. Сторонники третьего считают, что "нанотехнологии погубят мир", и, говоря об опасностях нанотехнологий, подразумевают процессы, прямо связанные с наномехатронными системами — запрограммированными наноассемблерами и нанодизассемблерами. Имеется в виду вариант с сумасшедшим ученым или группой террористов, занимающихся разработкой "нанороботов Судного дня", либо вариант выхода нанодизассемблеров из-под контроля человека. В этом случае, согласно сценарию конца света, именуемого "экофагией", какой-нибудь выгнанный с факультета информационной безопасности студент запустит квантовый вирус и свихнувшиеся нанодизассемблеры разберут половину жителей Земли на части, превратив их в "серую слизь".

Следует заметить, что ведущие зарубежные эксперты по высоким технологиям пришли к выводу, что "шумиха вокруг нанотехнологий (т. е. необоснованные заявления об их фантастических возможностях) может в будущем оказаться ключевым фактором их отторжения в обществе". Как утверждают ветераны высоких технологий и пионеры нанотехнологий Ратнеры (M. & D. Ratners) [40, с. 187]: "если эйфория и шумиха снова не выдержат тщательной проверки усердием и рынком, будет огромный простор для инвесторов и компаний, а также мошенников и аферистов", и в конечном итоге "возрастет риск неэтичного применения и распространения нанотехнологий, как это уже было с информационными технологиями". Именно поэтому нанотехнологии, как и всякий технологический рывок, вызвали сначала недоверие, а затем затянувшийся этап эйфории, по окончании которого наступил этап реального их осмысления, разработки, внедрения и практической эксплуатации.

Разобраться, где речь идет о подлинной нанотехнологии, а где имеет место всего лишь популизм и самореклама, стало не так просто. И все же можно констатировать спокойное, взвешенное и даже осторожное отношение научного сообщества к нанотехнологическому "буму": ученые не впадают в эйфорию и не бросаются в новую область, а продолжают заниматься своими исследованиями, вставляя лишь, где можно, префикс "нано".

Ясно, что грандиозные ожидания, связанные с развитием нанотехнологий, несколько преувеличены, однако *потенциал их слишком высок, чтобы его игнорировать*, причем в условиях этой шумихи "нанооптимисты" и "нанопессимисты" согласны в одном: "не имеет значения, кто вы и чем вы занимаетесь, в скором времени данные технологии вмешаются в вашу жизнь".

Вспоминая известное изречение Кэрролла (L. Carroll): "Чтобы оставаться на месте, надо бежать изо всех сил. Чтобы двигаться вперед, надо бежать вдвое быстрее" и перефразируя Е. А. Гудилина, можно заключить, что нанотехнологический бум — это то, что может помочь всем нанонаукам, включая наномехатронику, обрести новую жизнь.

Молекулярная сборка невозможна: "химия, как и любовь, — гораздо утонченнее механики"

В научном сообществе достаточно сильно распространено критическое отношение к нанотехнологиям и, в частности, ко взглядам Дрекслера на молекулярную сборку (см., например, [41, 42]). Здесь следует особо выделить Нобелевского лауреата, инициатора и ведущего участника американской программы Национальной нанотехнологической инициативы (NNI) Смолли (R. Smalley), который оказался абсолютно нетерпимым к полуфантастическим идеям Дрекслера.

В сентябре 2001 г. Смолли опубликовал в журнале "*Scientific American*" статью под названием "О нанотехнологии, любви и нанороботах" с подзаголовком: "Как скоро появятся нанороботы, предсказанные К. Эриком Дрекслером и другими сторонниками молекулярной нанотехнологии? Простой ответ — никогда". Здесь он попытался обосновать несостоятельность моделей нанороботов-сборщиков и впервые однозначно и четко обозначил свою позицию: позиционная молекулярная сборка невозможна.

По его мнению, ошибочно полагать, что можно манипулировать отдельным атомом без его связи с окружающими. "Идея наномашин не учитывает основ химии. Химия — это не просто установка одного атома на нужное место... Это, по меньшей мере, совместное движение десятка атомов". Следовательно, в процессе сборки для передвижения одного атома наносборщик должен иметь как минимум десять наноманипуляторов, контролирующих атомную реакцию, что приводит к так называемой "проблеме толстых пальцев". Дело в том, что нанометр примерно равен восьми диаметрам атомов кислорода и при постройке устройства длиной в сотни нанометров для наноманипуляторов просто не хватит места. А если все же каким-то чудом удалось захватить атом, то возникает так называемая "проблема липких пальцев": его необходимо как-то отделять от соседей. Химия, по Смолли, подобна любви и "невозможно провести направленную химическую реакцию двух молекул простым механическим перемещением", как и невозможно заставить полюбить друг друга юношу и девушку при простом сведении их вместе.

Спустя два года Смолли выступил уже на страницах журнала "*Chemical and Engineering News*" с резкой критикой основных положений концепции молекулярной сборки Дрекслера, утверждая, что "если бы возможность саморазмножения нанороботов и существовала, то нанороботу, способному мультиплицировать себя со скоростью миллион атомов в секунду, потребовалось бы 20 миллионов лет, чтобы накопить одну унцию продукта саморазмножения. Однако и этот скромный по результатам процесс невозможен, так как он потребовал бы огромных энергетических затрат". Кроме этого, полагая, что дрекслеровские предприятия по молекулярной сборке целиком состоят из биологических систем, Смолли утверждал, что химия ферментов возможна лишь в водной среде и невозможна на сухих поверхностях или в вакууме.

Несмотря на то, что Дрекслер опроверг все доводы Смолли, дискуссия двух выдающихся ученых так и не привела к согласию. Спор между Дрекслером и Смолли продолжался еще некоторое время, однако никаких полезных идей для дальнейшего развития нанотехнологий из него не родилось. В научном отношении критика моделей молекулярного производства оказалась несостоятельной, хотя Дрекслеру все же пришлось отказаться от идеи наноассемблеров и развенчать миф об их способности к самовоспроизведению [43]. Кто же все-таки прав — Дрекслер или Смолли, — покажет время.

Основные проблемы наномехатроники

Конвергенция мехатроники с нанотехнологиями связана с постижением предельно возможного, "молекулярного" масштаба, который настолько мал, что человеческое воображение практически неспособно его сколько-нибудь адекватно представить. В отличие от традиционных технологий нанотехнологии характеризуются повышенной наукоемкостью, затратностью, а также междисциплинарностью и неэффективностью решения задач методом "проб и ошибок", который, как правило, и используется в сложных прикладных разработках. В связи с этим использование традиционного стиля мышления и общепринятой методологии при проектировании наномехатронных систем оказывается чрезвычайно сложным. Это сопряжено с проведением большого объема фундаментальных и прикладных научных и технологических исследований, направленных на разработку способов изготовления необходимых нанокомплектующих элементов и создание технологических инструментов и установок для осуществления соответствующих наносборочных процессов. Укажем лишь на некоторые принципиальные теоретические и прикладные проблемы современной наномехатроники.

Основной теоретической проблемой наномехатроники является отсутствие удовлетворительного научного фундамента [44]. Имеются лишь некоторые инструменты эмпирического исследования и накоплена богатая феноменология. В частности, до сих пор отсутствует теория молекулярного синтеза. Более того, отсутствуют даже параметрические модели атомов и молекул, отражающие их размеры, энергию связи и энергию парных взаимодействий,

на основе которых должен проводиться расчет синтезируемых молекулярных образований.

Принципиальная трудность создания наномехатронных систем заключается в их проектировании, которое основывается на методах компьютерного моделирования. Расчет конструкции системы настолько трудоемок и сложен, что для его осуществления не хватает мощности даже современных суперкомпьютеров. Например, для моделирования эволюции наносистемы, состоящей из трех десятков молекулярных образований, могут понадобиться гигабайтные объемы оперативной памяти. Дело в том, что на молекулярном уровне вместо макроскопических законов классической механики, используемых для расчета обычных мехатронных систем, вступают в действие законы квантовой механики. Здесь приходится учитывать силы вязкости, поверхностного натяжения, сухого трения, электростатические и магнитные силы, а также собственные колебания, диффузию атомов, броуновское движение, ядерный распад, "горячие" частицы и т. п. Кроме этого, любая молекулярная структура может иметь несколько энергетически выгодных состояний, а поскольку ее образование в реальных условиях протекает вдали от равновесия, то на нее существенное влияние оказывают даже незначительные возмущающие воздействия. В связи с этим при синтезе молекулярных систем необходимо учитывать их неустойчивость и высокую реакционную способность, которые могут привести к изменению структуры и потере необходимых свойств при взаимодействии с окружающей средой.

Кстати, компания Нанорекс (Nanorex) разработала программу "НаноИнженер", позволяющую быстро и легко проектировать молекулярные системы размером до 100 тыс. атомов на основе квантово-механических расчетов. На рис. 9 (см. четвертую страницу обложки) представлены некоторые окна данной программы.

Следует сделать замечание, касающееся проблемы самих технологических нанороботов. Основными их функционально необходимыми элементами являются: система энергопитания для получения и/или аккумуляции энергии; система связи для приема и передачи информации; сенсорная система для навигации и управления технологическими операциями; интеллектуальная информационно-управляющая система на основе встроенного нанокомпьютера и исполнительная система для выполнения технологических операций. Все это должно уместиться в пределах одного наноробота примерно в одном миллиарде атомов. Ясно, что реализация каждого из этих элементов представляет собой огромную проблему не только прикладного, но и фундаментального характера. Например, при обмене наноробота информацией с макросистемой (человеком) встает вопрос о достоверности этой информации, поскольку, в силу принципа неопределенности, она может быть либо неопределенной, либо искаженной в результате действия "эффекта наблюдения". Далее, при движении наноробота он будет испытывать на себе воздействие броуновского движения, т. е. принимать на себя толчки хаотически перемещающихся молекул, поэтому встает вопрос о направленности его движения, поскольку он будет постоянно сбиваться с заданного курса.

Основной прикладной проблемой наномехатроники является организация массового производства наномехатронных систем. Все существующие нанотехнологии, связанные с манипуляциями отдельными атомами и молекулами, характеризуются большой громоздкостью, низкой производительностью и малой эффективностью, что является не только их слабым местом, но и принципиально неустранимым недостатком. Это касается, в частности, зондовых технологий на основе СТМ/АСМ-манипуляций. Наряду с низкой производительностью, здесь имеются такие проблемы, как прилипание зонда к грязной поверхности, нелинейность и крип (эффект ползучести) пьезокерамики, а также вездесущие вибрации и т. д.

Имеются проблемы, связанные с наносборочными операциями. Автор метода мягкой литографии Уайтсайдс (G. Whitesides) подчеркивает, что для прецизионного манипулирования отдельными атомами щупальцы наноробота должны быть меньше атомов, что в принципе невозможно, так как "у них должны быть еще и механизмы, приводящие их в движения, которые не могут состоять ни из чего, кроме тех же самых атомов". Здесь же уместно упомянуть и проблему "толстых" и "липких" пальцев, выдвинутую Смолли в дискуссии с Дрекслером. Наконец, следует указать также и на проблему извлечения наноманипулятором конкретного атома из прочной "атомной связки": здесь значительная энергия потребуется для самой операции, и еще дополнительная энергия потребуется для отделения атома от захватов наноманипулятора.

Для ускорения процесса молекулярного синтеза природа использует массовый параллелизм, реализуемый самосборкой на основе самоорганизации, самовосстановления и эволюционного отбора хорошего решения. Однако в существующих нанотехнологиях подобные способы параллельной атомно-молекулярной сборки пока не найдены. Согласно мнению специалистов, для реализации массовой молекулярной сборки в наибольшей степени подходит так называемое *гибридное производство,* которое комбинирует литографию, наноманипулирование и электронную микроскопию.

Перспективы развития наномехатроники

Предсказание будущего — сомнительное и неблагодарное дело, поскольку слишком большое число факторов, лежащих на поверхности, могут неожиданно радикально изменить известные, казалось бы очевидные тенденции. В связи с этим известный фантаст Кларк (A. C. Clarke) считал, что практически невозможно предсказать детали будущих технологий на срок больше, чем половина столетия вперед. Касаясь перспектив развития наномехатроники, укажем, прежде всего, на два его оптимистических прогноза: 2015 г. — расцвет нанотехнологий и полный контроль над атомным строением вещества, а 2040 г. — воспроизведение с помощью "универсального репликатора" молекулярных копий любых заданных структур из практически любого сырья, обладающего должным набором химических элементов.

Ведущие американские специалисты предсказывают видимые последствия нанотехнологической революции уже в период 2015—2020 гг., когда будет осуществлен переход к практическому освоению технологий самосборки на основе атомного дизайна и появится *четвертое поколение продуктов с использованием нанотехнологий* — "молекулярных систем". При этом по прогнозам CRN (Центр ответственных нанотехнологий, США), молекулярное производство (наноассемблеры или нанофабрики), а также молекулярные системы могут стать реальностью уже к 2015 г., а по прогнозам NNI (Национальная нанотехнологическая инициатива, США) — около 2020 г. В то же время по мнению Берубе (D. Berube), автора известной книги "Наношумиха" (Na-no-Hype: The Truth Behind the Nanotechnology Buzz), "в США слово "нанотехнологии" в общественном восприятии связано с нанороботами, всякими наноустройствами, к которым мы даже близко не подошли" и от наноустройств типа дрекслеровских машин "нас отделяет примерно сотня лет". Кстати сам Дрекслер, все прогнозы которого сбывались с опережением, объявил, что к 2020 г. станет возможной промышленная сборка наноустройств.

У отечественных специалистов также нет единого мнения о перспективах развития молекулярных систем. Так, например, прогноз развития нанотехнологий до 2050 г., проведенный экспертами компании Nanotechnology News Network, выявил в качестве основной проблемы *разработку и создание наноассемблера.* В. В. Лучинин прогнозирует создание кластерных макромолекулярных систем с конвергенцией объектов живой и неживой природы уже в 2015—2020 гг. Согласно оптимистическому прогнозу Ю. Свидиненко, поскольку "инструментов для производства наномашин пока нет и они появятся лет через 10—20, то не стоит ждать реально работоспособных нанороботов и прочих чудес нанотеха раньше, чем через 40—50 лет", а по пессимистическому прогнозу расцвет нанотеха произойдет лишь к концу этого столетия. Кстати, в основных концепциях развития отечественной и зарубежной робототехники военного назначения до 2030 г. (см. [45]) нет упоминаний не то что о нанороботах, но даже о микророботах.

Прогнозы показывают, что направления нанотехнологий, связанные с созданием наноматериалов на основе традиционных химических и микроэлектронных методов, а также с попытками создания активных наноструктур на основе органики с использованием образцов живой природы, привлекательны в относительно краткосрочной перспективе. Потенциально более совершенным и перспективным является направление, связанное именно с молекулярным производством. В отличие от Кларка, по ожиданиям ученых, ориентировочно к 2030-м гг. нанотехнологии сделают возможным чрезвычайно дешевое автоматизированное производство с атомарной точностью любой заданной структуры из практически любого сырья, обладающего должным набором химических элементов. При этом каждый оператор "нанофабрики" сможет производить все, что позволит ее программное обеспечение. В 2006 г. Фрейтас опубликовал книгу "Экономическое влияние персональной нанофабрики" [46], представляющую собой анализ общественных последствий грядущей конвергенции мехатроники с нанотехнологиями. Автор указывает на прямую угрозу обществу со стороны молекулярного производства: фактически исключается человеческий труд, резко растет безработица, теряется смысл понятий стоимости, цены и денег. Как считает Дрекслер, в таком полностью обновленном обществе каждый человек получит максимальное разнообразие вариантов существования, возможность свободно избирать и менять образ жизни, экспериментировать, ошибаться и начинать все сначала.

Следует отметить, что в обсуждениях светлого будущего на околонаучных и футурологических сайтах во всей красе предстает наномифология: грядущие наносистемы представляются наподобие маленьких человечков, которые способны делать за нас все и бесплатно. Очевидно, что все эти прогнозы и рассуждения основывается на аналогиях, а не на каких-либо строгих расчетах. Поскольку нанотехнологии пришли из мира будущего в мир настоящий, то можно надеяться, что наномехатроника — это не миф, а красивая мечта, которая в недалеком будущем станет явью, и "молекулярные мехатронные системы" прочно войдут в нашу жизнь.

Последняя четверть прошлого века ознаменовалась появлением четырех новых революционных направлений, которые призваны определять вектор технологического развития человечества. Речь идет о так называемых NBIC-технологиях (nano-bio-info-

cogno) [47], объединяющих нано-, информационные, биологические и когнитивные технологии. Здесь сначала на основе нанотехнологий создается "под заказ" любой материал. Далее использование биотехнологий дает гибридный материал. Затем подключение информационных и когнитивных технологий превращает гибрид в интеллектуальную систему. Наномехатронные системы как раз окажутся ярким примером взаимопроникновения и сближения всех четырех составляющих NBIC-технологий.

Список литературы

1. **Кобаяси Н.** Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
2. **Пул-мл. Ч. П., Оуэнс Ф. Дж.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006.
3. **Rieth M., Schommers W.** Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology. American Scientific Publishers, 2006.
4. **Singh-Nalwa H.** Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. Foreword by R. E. Smalley. American Scientific Publishers, 2004.
5. **Brenner D. W.** et al. Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, Second Edition / W. A. Goddard, D. W. Brenner, S. E. Lyshevski, G. J. Iafrate. CRC Pr I LIc, 2007.
6. **Гусев Б. В.** Развитие нанонауки и нанотехнологий // Промышл. и гражданское строит. 2007. № 4. С. 45—46.
7. **Жоаким К., Плевер Л.** Нанонауки. Невидимая революция. М.: Изд-во КоЛибри, 2009.
8. **Подураев Ю. В.** Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006.
9. **Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—11.
10. **Пупков К. А.** Интеллектуальные системы в мехатронике. URL: http://iu1.bmstu.ru/research/res20.htm.
11. **Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Мифы и реалии наномехатроники // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XI Междунар. конф. Самара: Изд-во Самарский НЦ РАН, 2008. С. 11—21.
12. **Ермолов И. Л.** Автономность мобильных наномехатронных устройств // Приводная техника. 2008. № 2. С. 48—54.
13. **Taniguchi N.** On the Basic Concept of "NanoTechnology" // Proc. ICPE Tokyo. 1974. V. 2. P. 18—23.
14. **Drexler K. E.** Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1981. V. 78. № 9. P. 5275—5278.
15. **Кузнецов Н. А., Баксанский О. Е., Гречишкина Н. А.** Нанотехнологии: наука, технология, системы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X Междунар. конф. Самара: Самарский НЦ РАН, 2008. С. 11—21.
16. **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. конф. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". 2008. С. 9—20.
17. **Фейнман Р. Ф.** Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики // Рос. хим. журнал, 2002, т. XLVI, № 5; http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html.
18. **Drexler E. K.** Engines Of Creation: The Coming Era of Nanotechnology. Doubleday, NY, 1986; **Дрекслер К. Э.** Машины создания. Грядущая эра нанотехнологии; http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000328.
19. **Drexler E. K., Chris Peterson Ch., Pergamit G.** Unbounding The Future — The Nanotechnology Revolution. William Morrow, NY, 1991; Simon and Schuster, 1992.
20. **Медведев Д. А., Попов А. А.** Молекулярные машины Эрика Дрекслера: Настоящее будущее нанотехнологий // Философские науки. 2008. № 1. С. 117—126.
21. **Новаковская Ю. В.** Молекулярные системы. Теория строения и взаимодействия с излучением. М.: Изд-во Эдиториал УРСС: Ч. I (Общие основы квантовой механики и теории симметрии), 2004; Ч. II (Квантовые состояния молекул), 2004; Ч. III (Полуклассическая теория взаимодействия молекул с излучением), 2005.
22. **Производственные наносистемы.** Обзор технологических перспектив. URL: www.nanometer.ru/2008/03/24/.../наносистемы1.pdf.
23. **Кац Е. А.** Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: Родословная форм и идей. М.: Изд-во ЛКИ, 2008.
24. **Миронов В. Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2005.
25. **Десять в минус девятой:** популярно о нанотехнологиях // Популярная механика. 2009. № 4.
26. **Фон Нейман Дж.** Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971.
27. **Phoenix Ch**. Design of a Primitive Nanofactory // Journ. of Evolution and Technology. 2003. October, V. 13.
28. **Рамбиди Н.Г., Березкин А.В.** Физические и химические основы нанотехнологий. М.: Физматлит, 2008.
29. **Nguyen T. D, Liu Y., Saha S., Leung K. C., Stoddart J. F., Zink J. I.** Design and Optimization of Molecular Nanovalves based on Redox-Switchable Bistable Rotaxanes // Journ. Am. Chem. Soc. 2007 Jan 24. 129(3). P. 626—34.
30. **Cumings J., Zettl A.** Low-Friction Nanoscale Linear Bearing Realized from Multiwall Carbon Nanotubes // Science. 289. 2000. P. 602—604.
31. **Williams P. A., Papadakis S. J., Patel A. M., Falvo M. R., Washburn S., Superfine R.** Fabrication of Nanometer-Scale Mechanical Devices Incorporating Individual Multiwalled Carbon Nanotubes as Torsional Springs // Applied Physics Letters. 2003. V. 82. No. 5. P. 805—807.
32. **Cumings J., Zettl A.** Low-Friction Nanoscale Linear Bearing Realized from Multiwall Carbon Nanotubes // Science. 289. 2000. P. 602—604.
33. **Ding B., Seeman N. C.** Operation of a DNA Robot Arm Inserted into a 2D DNA Crystalline Substrate // Science. 2006. Dec 8. 314(5805). P. 1583—1588.
34. **Wong K. L., Pawin G., Kwon K. Y., Lin X., Jiao T., Solanki U., Fawcett R. H., Bartels L., Stolbov S., Rahman T. S.** A Molecule Carrier // Science. 2007. Mar 9. 315(5817). P. 1391—1394.
35. **Chiaravalloti F., Gross L., Rieder K.-H., Stojkovic S. M., Gourdon A., Joachim Ch., Moresco F.** A Rack-and-Pinion Device at the Molecular Scale // Nature Materials. 2007. 6. P. 30—33.
36. **Christian A. M.** et al. A Nanoelectromechanical Single-Atom Switch // Nano Letters. 2009. 9(8), July 29. P. 2940—2945.
37. **Fennimore A. M., Yuzvinsky T. D., Han Wei-Qiang, Fuhrer M. S., Cumings J., Zettl A.** Rotational Actuators based on Carbon Nanotubes // Nature. 424. 2003. July 24. P. 408—410.
38. **Regan B. C., Aloni S., Jensen K., Ritchie R. O., Zettl A.** Nanocrystal-Powered Nanomotor // Nano Letters. 5. 2005. P. 1730—1733.
39. **Shirai Y., Morin J. F., Sasaki T., Guerrero J. M., Tour J. M.** Recent Progress on Nanovehicles // Chem Soc Rev. 2006. No 35(11). P. 1043—55.
40. **Ратнер М., Ратнер Д.** Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи. М.: Изд. дом "Вильямс", 2004.
41. **Baum R.** Nanotechnology: Drexler and Smalley make the case for and against 'molecular assemblers' // Chemical & Engineering News. 2003. V. 81. № 48.
42. **Свидиненко Ю.** О дебатах Дрекслера и Смоли // Компьютера. 2004. № 25. — URL: oldwww.computerra.ru/xterra/34701/.
43. **Drexler E. K.** Transcript, "Imaging and Imagining Conference", March 3, 2004.
44. **Потапов А. А.** Стратегия становления нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 6. С. 4—12.
45. **Крайлюк А. Д., Комченков В. И., Ивлев А. А., Юрин А. Д.** Основные концепции развития робототехники военного назначения до 2030 г. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 10—15.
46. **Ereitas R. A. Lr.** Economic Impact of the Personal Nanofactory // Nanotechnology Perceptions: A Review of Ultraprecision Engineering and Nanotechnology 2. 2006 May. P. 111—126.
47. **Bainbridge W. S.** Nanoconvergence: The Unity of Nanoscience, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, June 27, Prentice Hall, 2007.

УДК 621.865.8

В. Ф. Филаретов, д-р техн. наук, зав. лаб.,
А. С. Губанков, аспирант
Институт автоматики и процессов управления
ДВО РАН, г. Владивосток
filaret@pma.ru

Синтез адаптивных систем управления, настраивающихся по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами*

Предлагается метод синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами с переменными параметрами. Параметры регуляторов в этих системах подстраиваются на основе амплитудных частотных характеристик по мере изменения параметров объектов управления, обеспечивая максимально возможную скорость их движения без снижения заданной динамической точности управления. Выполненное моделирование подтвердило высокую эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: *адаптивное управление, переменные параметры, амплитудно-частотная характеристика, быстродействие, конвейер.*

Введение. Из теории автоматического управления известно [1], что при увеличении амплитуды и частоты входного сигнала динамическая точность систем автоматического управления с падающей амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) уменьшается. В результате без использования специальных средств коррекции часто не удается повысить скорость, а следовательно, и производительность работы технологического оборудования без ухудшения качества выполняемых операций [2]. Однако, если параметры указанного оборудования, а значит, и его АЧХ в процессе работы меняются, то с учетом этих изменений можно повышать частоту и амплитуду входного сигнала без ухудшения динамической точности управления даже при использовании типовых стационарных корректирующих устройств.

В настоящее время уже известно несколько методов адаптивной настройки параметров систем управления по частотным характеристикам объектов управления, которые позволяют сохранять заданную точность в процессе работы оборудования. В частности, в работе [3] предложен алгоритм настройки ПИ-регулятора, основанный на использовании активных частотных методов идентификации объектов. При этом настройка в замкнутом контуре осуществляется путем подачи на вход регулятора пробного синусоидального сигнала. Для точной настройки системы требуется определять комплексную частотную характеристику объекта в достаточно узком диапазоне. Недостатком этого алгоритма самонастройки является то, что он имеет итерационный характер, требующий предварительных установок параметров регулятора, близких к оптимальным, а также значительное время самой настройки.

В работах [4, 5] предложен принцип построения адаптивных регуляторов также с пробным гармоническим сигналом, который подается на вход объекта управления. При этом в целях ускорения процессов самонастройки в основной контур регулирования включается специальный фильтр, настраиваемый на частоту пробных колебаний. Этот принцип получил название принципа частотного разделения каналов управления и самонастройки с частотно-зависимой обратной связью. Недостатком указанного подхода и синтезируемой системы управления является то, что в благоприятных условиях и режимах работы не удается повышать быстродействие технологического оборудования. При этом сама система имеет достаточно сложную практическую реализацию.

Проведенный анализ показывает, что задача создания систем управления, которые с помощью достаточно простых технических средств в зависимости от текущих параметров объектов управления смогли бы постоянно поддерживать максимально возможную скорость работы технологического оборудования, не ухудшая динамическую точность управления, в настоящее время является весьма актуальной и полностью еще не решенной.

Целью данной работы является создание метода синтеза легко реализуемых адаптивных систем управления, которые в зависимости от текущих значений непрерывно изменяющихся параметров объектов управления с использованием их АЧХ могут поддерживать максимально возможную скорость работы технологического оборудования (выполнения технологических операций) без снижения заданной динамической точности управления.

*Работа поддержана РФФИ (гранты 09-08-00080, 08-08-90018).

Исследование особенностей работы исполнительных устройств при изменении режимов движения и уменьшении параметров нагрузки

В процессе выполнения различных технологических операций часто возникают ситуации, когда массоинерционные характеристики (параметры) объектов управления и режимы их движения изменяются в широких пределах, причем при уменьшении параметров нагрузки на исполнительные приводы появляется возможность повышения скорости их работы без ухудшения динамической точности управления объектами с изменяющимися параметрами. В работе [1] показывается, что для перемещения объектов с некоторой рабочей амплитудой $A_р$, частотой $\omega_р$ и динамической ошибкой ε, не превышающей величины $\varepsilon_{доп}$, необходимо, чтобы АЧХ $A(\omega)$ всей рассматриваемой системы на частоте $\omega_р = \omega_р^A$ не проходила ниже точки A с ординатой $A_р/\varepsilon_{доп}$ (рис. 1).

Цифрами *1* и *2* на рис. 1 обозначены АЧХ при максимальном и минимальном значениях параметров нагрузки системы, соответственно. Из рис. 1 видно, что, если значение параметра $A_р$ уменьшается, то точка *A* смещается вниз и совпадает, например, с точкой *E*. В этом случае при неизменных параметрах объекта управления, т. е. при неизменном виде АЧХ, при сохранении той же самой $\varepsilon_{доп}$ можно использовать уже новую повышенную частоту $\omega_р^C$ гармонического входного сигнала, повышая скорость перемещения объекта и, тем самым, производительность работы всей системы в целом. Если же параметры объекта управления изменяются таким образом, что АЧХ системы принимает вид кривой *2* на рис. 1, а величина $A_р$ не изменяется по сравнению с ее первоначальным значением, то без ухудшения динамической точности работы системы точка *A* может быть горизонтально перемещена в точку *B* на кривой *2*. Очевидно, что в этом случае для увеличения скорости работы оборудования без снижения динамической точности управления также можно использовать повышенную частоту входного сигнала — $\omega_р^B$. Если же значение $A_р$ уменьшается, то точка *E* с учетом вида кривой *2* при сохранении заданной точности управления может быть смещена по горизонтали уже в точку *D*. При этом частота гармонического входного сигнала может быть повышена уже до значения $\omega_р^D$.

Таким образом, в зависимости от текущих значений параметров объектов управления и амплитуд гармонического входного сигнала без снижения динамической точности управления можно значительно изменять частоту этого сигнала, существенно повышая скорость работы и, соответственно, производительность используемого технологического оборудования без изменения структуры и параметров используемых регуляторов.

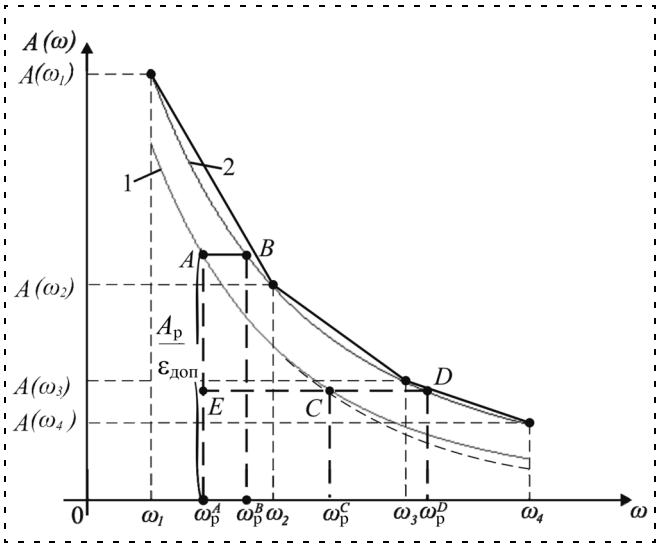


Рис. 1. АЧХ системы для различных значений параметров объекта управления

Описание объекта управления

Синтез предлагаемой адаптивной системы управления рассмотрим на примере одностепенного манипулятора *1* (рис. 2), совершающего колебательные движения рабочего инструмента, или накопителя деталей, *2* с амплитудой $A_р$ и частотой $\omega_р$ над дви-

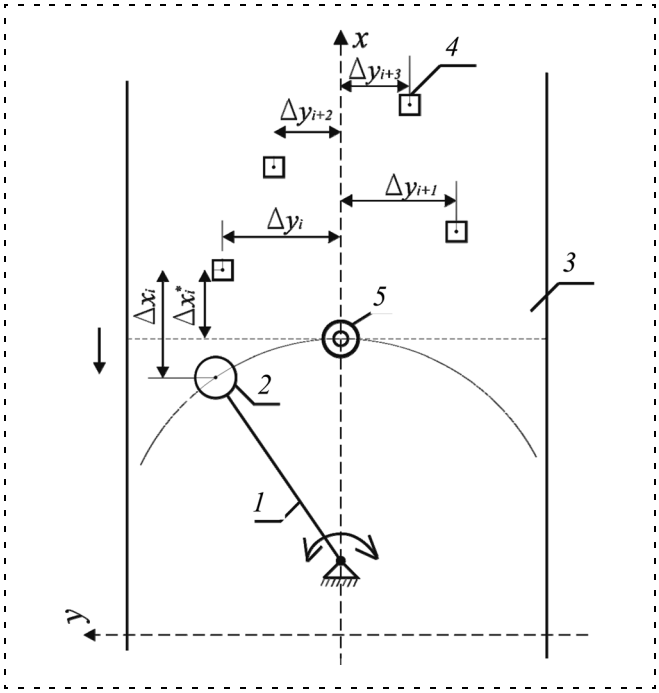


Рис. 2. Схема технологического процесса

жущейся транспортерной лентой *3* с объектами *4*, с которыми требуется выполнять некоторые технологические операции. При этом сами объекты могут располагаться на различном расстоянии Δy_i от центральной оси транспортерной ленты *x*.

В качестве исполнительных элементов для манипулятора *1* и ленты *3* (рис. 2) используются электроприводы с электродвигателями постоянного тока независимого возбуждения или с постоянными магнитами. Уравнения электрической и механической цепей этих электродвигателей имеют следующий вид:

$$L\frac{di}{dt} + Ri + K_\omega\dot{\alpha} = K_у u; \qquad (1)$$

$$M_д = J_\Sigma\ddot{\alpha} = K_м i,$$

где R, L — соответственно, активное сопротивление и индуктивность якорной цепи электродвигателя; $K_м$, K_ω — соответственно, коэффициенты крутящего момента и противоЭДС; $K_у$ — коэффициент усиления усилителя мощности; u, i — соответственно, напряжение и ток в якорной цепи электродвигателя; $M_д$ — момент, развиваемый электродвигателем; J_Σ — суммарный момент инерции, приведенный к валу электродвигателя; $\dot{\alpha}$, $\ddot{\alpha}$ — соответственно, скорость и ускорение вращения вала электродвигателя.

Для обеспечения требуемых показателей качества работы в прямую цепь обоих электроприводов введены типовые последовательные корректирующие устройства, с передаточной функцией вида [6]

$$W_{kj}(S) = \frac{T_1 S + 1}{T_2 S + 1}, \qquad (2)$$

где $T_1 = \frac{1}{\omega_{ср}}$; $T_1 > T_2, j = 1, 2$. Выбор частоты среза $\omega_{ср}$ АЧХ системы и T_2 зависит от конкретных параметров электропривода и будет описан ниже. С учетом коррекции (2) и дифференциальных уравнений (1) передаточная функция разомкнутой цепи каждого электропривода будет иметь вид

$$W(S) = \frac{K(T_1 S + 1)}{S(T_2 S + 1)(T_3 S^2 + T_4 S + 1)}, \qquad (3)$$

а АЧХ, построенная на основе передаточной функции (3), — вид

$$A(\omega) = \frac{K\sqrt{1 + T_1^2\omega^2}}{\omega\sqrt{(1 + T_2^2\omega^2)(1 + T_5^2\omega^2)(1 + T_6^2\omega^2)}}, \qquad (4)$$

где $T_3 = \frac{LJ_\Sigma}{K_м K_\omega}$, $T_4 = \frac{RJ_\Sigma}{K_м K_\omega}$, $T_{5,6} = \frac{T_4}{2} \pm \sqrt{\frac{T_4^2}{4} - T_3}$, $T_5 > T_6$, $K = \frac{K_у}{K_\omega i_р}$, $i_р$ — передаточное отношение редуктора.

В процессе выполнения манипулятором различных технологических операций величина J_Σ может непрерывно или дискретно изменяться, принимая значения из диапазона: $J_{min} \leqslant J_\Sigma \leqslant J_{max}$. В данной работе полагается, что величина J_Σ изменяется или дискретно, или не более, чем на 10 % за время переходного процесса в электроприводе. В этом случае может быть использован традиционный аппарат передаточных функций [7].

Формирование рабочей частоты входного сигнала на основе кусочно-линейной аппроксимации АЧХ

Как уже было отмечено ранее, в процессе выполнения различных технологических операций величины J_Σ и $A_р$ при движении манипулятора (рис. 2) могут изменяться. В результате (см. рис. 1) появляется возможность подстраивать частоту $\omega_р$ входного сигнала так, чтобы получать максимально возможную скорость выполнения технологических операций, не превышая величины $\varepsilon_{доп}$. Из (4) видно, что даже для простой системы получить аналитическое выражение, описывающее зависимость $\omega_р = f(A_р, J_\Sigma, \varepsilon_{доп})$, весьма сложно. Поэтому вначале целесообразно линейно аппроксимировать текущую АЧХ, а затем с помощью полученной линейной зависимости по известной ординате $A_р/\varepsilon_{доп}$ уже находить искомую частоту $\omega_р$ (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что аппроксимация некоторого участка АЧХ отрезком прямой (секущей), расположенной между точками с ординатами $A(\omega_1)$ и $A(\omega_2)$, приведет к тому, что при использовании этого от-

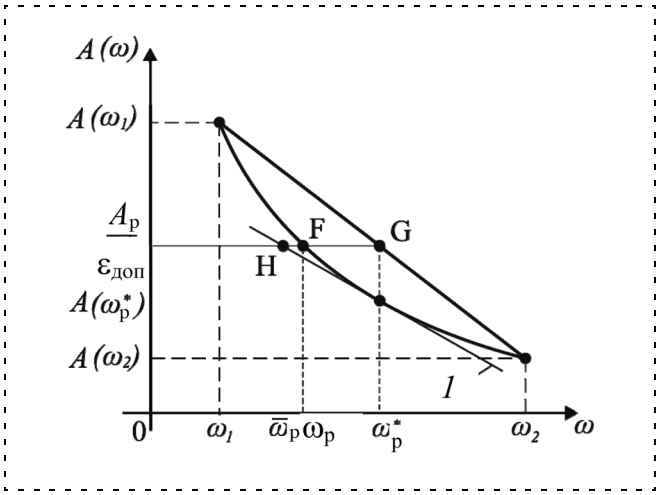


Рис. 3. Линейная аппроксимация участка АЧХ

резка для известной ординаты $A_р/\varepsilon_{доп}$ будет найдена частота $\omega_р^*$ (абсцисса точки G на рис. 3), бóльшая искомой частоты $\omega_р$ (абсцисса точки F на рис. 3). Но использование $\omega_р^*$ при формировании входного сигнала приведет к тому, что динамически точность системы ухудшится, превысив $\varepsilon_{доп}$.

Для устранения указанной негативной ситуации при поиске текущего значения $\omega_р$ в работе предлагается использовать другую аппроксимирующую прямую, которая является касательной к АЧХ системы в точке с абсциссой $\omega_р^*$ (прямая *1* на рис. 3). Получив уравнение этой касательной, несложно определить абсциссу точки H с ординатой $A_р/\varepsilon_{доп}$, всегда удовлетворяющую неравенству $\overline{\omega}_р < \omega_р$. Очевидно, что выбор $\overline{\omega}_р$ приведет к некоторому снижению быстродействия системы, но при этом всегда будет выполняться неравенство $\varepsilon \leqslant \varepsilon_{доп}$. Исследования показали, что для реальных систем $\overline{\omega}_р$ в большинстве случаев находится вблизи $\omega_р$.

При линейной аппроксимации всей АЧХ диапазон рабочих частот $[\omega_{min}; \omega_{max}]$ системы может быть разбит на n произвольных отрезков в зависимости от величины этого диапазона и кривизны получаемой АЧХ. Очевидно, что чем больше n, тем точнее будут осуществляться указанная аппроксимация и выбор $\omega_р$. Однако исследования показали, что для многих систем вполне допустимо выбирать $n = 3$, а указанные отрезки частоты — равными. В результате по формуле (4) можно построить $A(\omega)$ (см. рис. 1) для любого значения J_Σ системы (1), задаться четырьмя опорными точками ($\omega_1 = \omega_{min}$, $\omega_2 = \frac{1}{3}\omega_{max} + \frac{2}{3}\omega_{min}$, $\omega_3 = \frac{2}{3}\omega_{max} + \frac{1}{3}\omega_{min}$, $\omega_4 = \omega_{max}$) и, используя известную формулу прямой, проходящей через две точки [8], найти уравнения всех трех секущих

$$\frac{A(\omega) - A(\omega_i)}{A(\omega_{i+1}) - A(\omega_i)} = \frac{\omega - \omega_i}{\omega_{i+1} - \omega_i}, \ (i = \overline{1, 3}), \qquad (5)$$

где $(\omega_i, A(\omega_i))$, $(\omega_{i+1}, A(\omega_{i+1}))$ — соответственно, координаты начальной и конечной точек отрезка конкретной секущей.

Из уравнения (5) следует, что, если некоторая точка, имеющая ординату $A_р/\varepsilon_{доп}$, находится на одной из указанных выше трех секущих, то абсцисса $\omega_р^*$ этой точки может быть рассчитана с помощью выражения

$$\omega_р^* = K_i\left(\frac{A_р}{\varepsilon_{доп}} - A(\omega_i)\right) + \omega_i, \qquad (6)$$

где $K_i = \dfrac{\omega_{i+1} - \omega_i}{A(\omega_{i+1}) - A(\omega_i)}$.

Зная величину $A_р/\varepsilon_{доп}$ и текущую характеристику $A(\omega)$, можно однозначно определить одну из трех секущих, которая используется в данный момент времени (см. рис. 1). Если $A_р/\varepsilon_{доп} > A(\omega_2)$, то используется первая секущая ($i = 1$), если $A(\omega_3) < A_р/\varepsilon_{доп} < A(\omega_2)$, то выбирается вторая секущая ($i = 2$), и, наконец, если $A_р/\varepsilon_{доп} < A(\omega_3)$, то $i = 3$.

После нахождения $\omega_р^*$ по формуле (6) и затем значения $A(\omega_р^*)$ по формуле (4) можно определить уравнение касательной к АЧХ $A(\omega)$ в точке $(\omega_р^*, A(\omega_р^*))$ [8]:

$$A(\omega) - A(\omega_р^*) = A'(\omega_р^*)(\omega - \omega_р^*), \qquad (7)$$

где $A'(\omega_р^*) = K\sqrt{\dfrac{1 + \omega_р^{*2}T_1^2}{(1 + \omega_р^{*2}T_2^2)(1 + \omega_р^{*2}T_5^2)(1 + \omega_р^{*2}T_6^2)}} \times$

$\times \left(\dfrac{T_1^2}{1 + \omega_р^{*2}T_1^2} - \dfrac{1}{\omega_р^{*2}} - \dfrac{T_2^2}{1 + \omega_р^{*2}T_2^2} - \dfrac{T_3^2}{1 + \omega_р^{*2}T_5^2} - \right.$

$\left. - \dfrac{T_4^2}{1 + \omega_р^{*2}T_6^2}\right)$ — производная $A(\omega)$ (см. выражение (4)) в точке $\omega = \omega_р^*$, а из уравнения (7) — искомую частоту входного сигнала

$$\overline{\omega}_р = \frac{1}{A'(\omega_р^*)}\left(\frac{A_р}{\varepsilon_{доп}} - A(\omega_р^*)\right) + \omega_р^* < \omega_р, \qquad (8)$$

которая обеспечит существенное повышение быстродействия рассмотренной выше системы (см. рис. 2) при сохранении неравенства $\varepsilon < \varepsilon_{доп}$ для любых значений параметров $A_р$ и J_Σ.

Формирование рабочей частоты входного сигнала на основе упрощенного описания АЧХ

Довольно часто передаточные функции систем имеют много постоянных времени, которые оказывают влияние на вид их АЧХ только в высокочастотных областях, далеких от рабочих частот. В результате указанными малыми постоянными времени можно пренебречь и получить достаточно простые аналитические описания АЧХ. Эти описания в дальнейшем можно использовать для расчета изменяющихся рабочих частот вводных сигналов систем при изменениях их параметров. В частности, при малом значении L имеет место неравенство $T_5 \gg T_6$. Если при этом $T_5 \gg T_1$ и $T_5 \gg T_2$, то вместо АЧХ (4) можно использовать ее упрощенное аналитическое описание

$$A(\omega) \approx \frac{K}{\omega\sqrt{(1 + T_5^2\omega^2)}}. \qquad (9)$$

Вид АЧХ, построенной с использованием выражения (9), показан штриховой линией на рис. 1 (рядом с кривой *1*). Из рис. 1 видно, что изменения в упрощенной АЧХ, построенной по выражению (9), по сравнению с АЧХ, построенной по выражению (4), начинаются намного правее рабочих частот реальных входных сигналов и практически не влияют на расчет этих частот. Таким образом, в указанном случае для нахождения $\omega_р$ вполне можно использовать выражение

$$\frac{A_р}{\varepsilon_{доп}} = \frac{K}{\omega\sqrt{(1 + T_5^2\omega^2)}}, \qquad (10)$$

полученное на основе выражения (9). Из (10) формируется уравнение

$$T_5^2\omega_4 + \omega_2 - \frac{K^2\varepsilon_{доп}^2}{A_р^2} = 0,$$

используемое для нахождения единственного положительного корня

$$\omega_р = \frac{\sqrt{-1 + \sqrt{1 + 4T_5^2K^2\varepsilon_{доп}^2A_р^{-2}}}}{T_5\sqrt{2}}. \qquad (11)$$

Из рис. 1 видно, что формулу (11) можно использовать для определения и высокочастотных $\omega_р$, но в этом случае оценка $\omega_р$ будет несколько заниженной. Выражение (11) позволяет определять $\omega_р$ в реальном масштабе времени при непрерывных изменениях параметров объекта управления. Это удобно для практической реализации используемого алгоритма адаптации.

Описание работы системы управления движением манипулятора и транспортерной ленты

Из рис. 2 видно, что рабочий орган манипулятора при подаче на вход его электропривода гармонического сигнала

$$\alpha^*(t) = A_{рi}\sin(\omega_{рi}t),\ i = \overline{1, n}, \qquad (12)$$

будет перемещаться с частотой $\omega_{рi}$ по дуге окружности, радиус l которой совпадает с длиной звена манипулятора, где n — число объектов, установленных на транспортерной ленте. Телекамера *5* находится над этой лентой и позволяет определять расположение очередного объекта на ней, т. е. величину Δy_i относительно оси x и Δx_i^* вдоль этой оси. Технологические операции со всеми объектами выполняются только в крайних положениях манипулятора, когда он отклоняется от оси x на угол

$$A_{рi} = \arcsin(\Delta y_i/l), \qquad (13)$$

а скорость движения его рабочего органа относительно объектов равна нулю.

Транспортерная лента начинает перемещаться на очередную дискретную величину

$$\Delta x_i = \Delta x_i^* + l(1 - \cos A_{рi}) \qquad (14)$$

только после выполнения технологической операции с предыдущим объектом и затем останавливается в ожидании подхода рабочего органа манипулятора к вновь перемещенному объекту, расположенному уже на другой стороне относительно оси x. Указанные циклы работы повторяются со всеми оставшимися объектами.

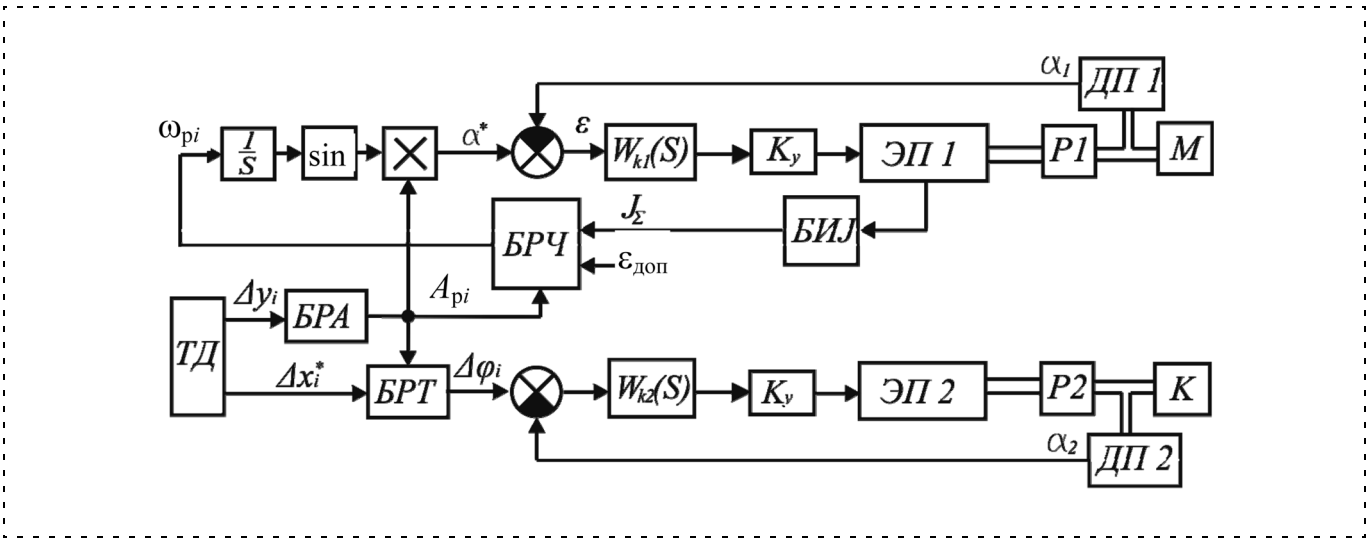


Рис. 4. Структурная схема адаптивной системы управления манипулятором и конвейером

Перемещение ленты транспортера на расстояние Δx_i обеспечивается с учетом выражения (14) путем поворота ее ведущего колеса на угол

$$\Delta\varphi_i = \Delta x_i / r, \qquad (15)$$

где r — радиус этого колеса.

Структурная схема предложенной адаптивной системы управления манипулятором и конвейерной лентой показана на рис. 4. Здесь введены следующие обозначения: ε — сигнал динамической ошибки манипулятора; *ЭП*1, *ЭП*2 — электроприводы, управляющие манипулятором и транспортером, соответственно; *ДП*1, *ДП*2 — соответствующие датчики положения; α_1, α_2 — выходные сигналы *ДП*1 и *ДП*2, соответственно; *Р*1, *Р*2 — редукторы; *М* — одностепенной манипулятор; *К* — ведущее колесо транспортера; *ТД* — телевизионный датчик; *БРА* — блок расчета A_{pi} гармонического сигнала по формуле (13); *БРТ* — блок расчета $\Delta\varphi_i$ по формулам (14) и (15); *БИJ* — блок идентификации J_Σ, построенный с использованием устройства, описанного в работе [2]; *БРЧ* — блок расчета ω_{pi} по формулам (8) или (11) с учетом текущего значения J_Σ.

Отметим, что для обеспечения стабильной работы системы управления манипулятором очередное изменение величины A_{pi} в выражении (12), если это необходимо, следует выполнять в момент, когда манипулятор совпадает с осью x, т. е. когда $\alpha^*(t) = 0$.

Поскольку в процессе работы системы частота ω_{pi}, рассчитываемая по формулам (8) или (11), изменяется скачкообразно, то при вычислении $\alpha^*(t)$ (12) в целях исключения скачков этого входного сигнала величину $\omega_{pi}t$ целесообразно рассчитывать с помощью интегратора, на вход которого подается ступенчато изменяющийся сигнал ω_{pi} (рис. 4).

Ниже будут представлены результаты исследования синтезированных адаптивных систем управления манипулятором и транспортерной лентой.

Исследование работы синтезированных адаптивных систем управления

При моделировании исследовали процесс установки манипулятором некоторых деталей на девять объектов, поочередно перемещаемых транспортером. Указанные детали помещали в накопитель манипулятора. Гармоническим движением манипулятора длиной $l = 0{,}4$ м и ведущим колесом транспортера радиусом $r = 0{,}1$ м управляют одинаковые электроприводы, построенные на основе электродвигателей постоянного тока. Эти приводы имеют следующие постоянные параметры: $K_у = 1500$, $K_м = 0{,}02$ Н · м/А, $K_\omega = 0{,}02$ В · с, $R = 0{,}4$ Ом, $L = 0{,}004$ Гн, $T_1 = 0{,}024$ с, $T_2 = 0{,}0012$ с, $i_р = 80$.

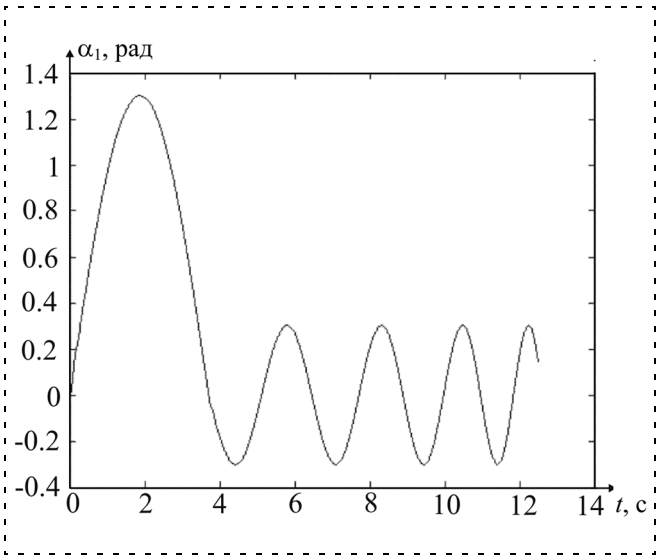


Рис. 5. Закон изменения выходного сигнала α_1 электропривода манипулятора

Объекты на транспортере располагали таким образом, что для первого объекта $A_{pi} = 1{,}3$ рад, а для всех последующих $A_{pi} = 0{,}3$ рад. При этом J_Σ изменялся от 0,001 до 0,0002 кг · м^2, уменьшаясь скачкообразно на величину 0,0001 кг · м^2 на каждом цикле поворота манипулятора, а $\varepsilon_{доп} = 0{,}0015$ рад.

На рис. 5 показан закон изменения выходного сигнала электропривода манипулятора в процессе его работы при указанных выше изменениях J_Σ, A_{pi} и ω_{pi}, а на рис. 6 — законы изменения ω_{pi} этого сигнала. Цифрами *1* и *2* на рис. 6 обозначены частоты, рассчитанные по формулам (8) и (11), соответственно, а цифрой *3* — частота входного сигнала

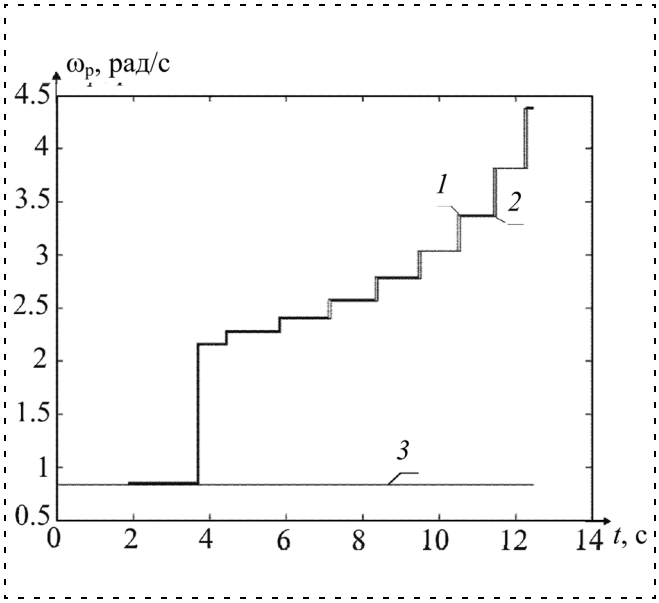


Рис. 6. Законы изменения ω_{pi} входного сигнала электропривода манипулятора

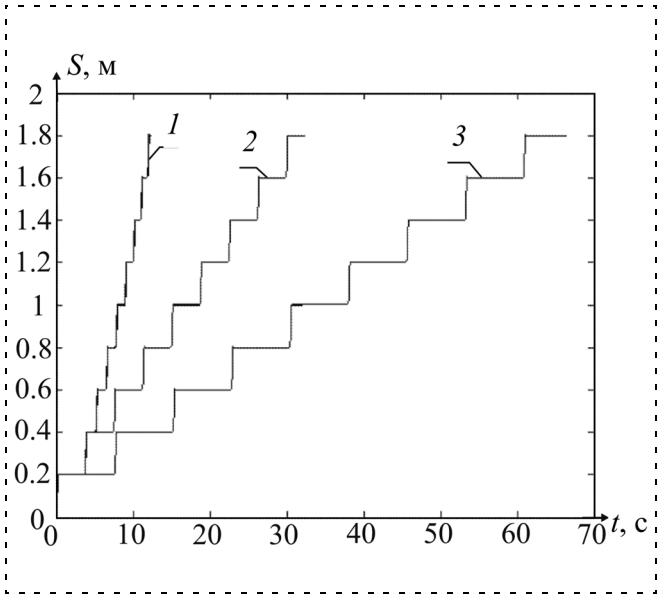


Рис. 7. Законы перемещения ленты транспортера при различных законах формирования управляющих сигналов

электропривода манипулятора в системе, не использующей адаптивные подстройки частоты. Из рис. 6 видно, что при расчете ω_{pi} по формулам (8) и (11) получаются практически одинаковые результаты, хотя с ростом ω_{pi} кривая *2* начинает проходить несколько ниже кривой *1*, причем при указанном изменении параметров нагрузки электропривода манипулятора величина ω_{pi} в адаптивной системе может повышаться более чем в 5,2 раза, значительно увеличивая производительность выполнения технологических операций.

На рис. 7 показаны законы перемещения ленты транспортера *S* и время выполнения одного цикла работ с девятью объектами при использовании адаптивных алгоритмов подстройки ω_{pi} (кривая *1*), при постоянном исходном значении ω_{pi} (кривая *2*) и при использовании в качестве входного сигнала электропривода манипулятора не гармонического, а ступенчатого сигнала той же величины (кривая *3*). При этом во всех трех случаях значение $\varepsilon_{доп}$ оставалось постоянным. Горизонтальные участки кривых на рис. 7 соответствуют времени простоя транспортера в ожидании подхода манипулятора, а наклонные — времени его перемещения. Увеличенное время выполнения одного рабочего цикла в системе со ступенчатым входным сигналом объясняется резким повышением тока в обмотках электродвигателя в начале его движения. Этот ток специально ограничивали по величине в целях сохранения работоспособности используемого электромеханического оборудования.

Из рис. 7 видно, что при гармоническом входном сигнале и заданных выше законах изменения A_p и J_Σ используемая адаптивная система управления за счет повышения частоты указанного сигнала позволяет в 2,6 раза увеличить производительность работы оборудования без превышения $\varepsilon_{доп}$. Это подтверждает высокую эффективность адаптивных систем управления, синтезированных на основе предлагаемых в данной статье алгоритмов определения рабочей частоты движения манипулятора.

Заключение

В данной статье предложен и исследован метод синтеза адаптивных систем, предназначенных для подстройки частоты гармонического движения мехатронных объектов в целях повышения скорости (производительности) их работы в процессе изменения параметров нагрузки без снижения динамической точности управления. Подстройка частоты управляющих сигналов осуществляется на основе АЧХ систем. Результаты моделирования полностью подтвердили эффективность и высокое качество синтезированных систем в различных режимах их работы. Реализация этих систем не представляет затруднений.

Список литературы

1. **Попов Е. П.** Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1978. 256 с.
2. **Филаретов В. Ф.** Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 304 с.
3. **Ротач В. Я., Клюев А. С.** и др. Автоматизация настройки систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272 с.
4. **Карпов В. С., Мазуров В. М.** Адаптивные регуляторы состояния с частотным разделением каналов управления и самонастройки для объектов с запаздыванием // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 168—176.
5. **Мазуров В. М., Кондратьев В. В.** Адаптивный ПИД-регулятор с частотным разделением каналов управления и самонастройки // Приборы и системы управления. 1995. № 1. С. 33—35.
6. **Андреев В. Д., Ивкин А. М., Кулешов В. С.** и др.: Под ред. Лакоты Н. А. Основы проектирования следящих систем. М.: Машиностроение, 1978. 391 с.
7. **Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Земляков С. Д.** Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М.: Наука, 1980. 244 с.
8. **Гусак А. А., Гусак Г. М., Бричикова Е. А.** Справочник по высшей математике. Мн.: ТетраСистемс, 1999. 640 с.

УДК 517.938

А. М. Бронников, д-р техн. наук, нач. кафедры,
Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
г. Москва
В. Н. Буков, д-р техн. наук,
зам. ген. директора по науке,
ФГУП Научно-исследовательский институт
авиационного оборудования,
г. Жуковский Московской обл.
bronnikov@mail.ru

Децентрализованное адаптивное управление с идентификацией и модельной координацией в многосвязных системах[1]

Обосновывается методика синтеза адаптивных децентрализованных регуляторов с идентификатором и эталонной моделью для многосвязных нестационарных линейных систем управления с параметрическими и внешними возмущениями. В отличие от большинства известных работ по децентрализованному управлению с модельной координацией рассматриваются локальные многосвязные системы с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO-системы). Заданная точность слежения за локальными эталонными моделями обеспечивается при упрощенных требованиях к идентификатору и не связывается напрямую с асимптотической точностью выдаваемых оценок параметров. Приведен методический пример.

Ключевые слова: *линейная многосвязная система, идентификация, эталонная модель, адаптивный регулятор, децентрализованное управление.*

Введение. Многие задачи управления многосвязными системами требуют использования децентрализованных структур, содержащих физически распределенные контроллеры. Децентрализованное управление применимо для широкого круга больших и сложных систем, включая управление сетью спутников, групповым полетом летательных аппаратов, системами электроэнергетики, робототехническими устройствами и др. Схемы децентрализованного управления дают возможность практического и эффективного проектирования алгоритмов управления, базирующихся только на локальной информации.

Задачи децентрализованной стабилизации и управления многосвязной системой в линейной, нелинейной, оптимальной, робастной и адаптивной постановках на протяжении последних десятилетий рассматривали многие авторы [1—6]. Для составных систем, содержащих многосвязные подсистемы или, другими словами, MIMO-подсистемы (multi-input, multi-output systems), наиболее распространенным является подход, основанный на использовании функций Ляпунова блочно-диагональной структуры, построении на их основе систем матричных линейных неравенств и разрешении их численными методами. К основным недостаткам этого подхода относятся отсутствие необходимых и достаточных условий разрешимости задачи синтеза и наличие ряда ограничений, накладываемых на структуру составной системы.

Децентрализация создает дополнительные информационные ограничения, так как выходной вектор каждой подсистемы доступен для измерения только локальному контроллеру и недоступен другим контроллерам. Поэтому использование децентрализованного подхода в чистом виде значительно ограничивает возможности управления. Так, в большинстве известных подходов децентрализованного адаптивного управления с эталонной моделью удается обеспечивать лишь сходимость ошибки слежения к некоторой ограниченной области, размеры которой не известны заранее и зависят от интенсивности неконтролируемых взаимосвязей.

Для устранения последнего недостатка в [5] была предложена концепция адаптивного децентрализованного управления с модельной координацией, при которой принимается допущение о доступности локальным контроллерам информации о состоянии эталонных моделей всех локальных подсистем. Использование этих сигналов позволило обеспечить асимптотическое отслеживание заданных эталонных траекторий с нулевой ошибкой. Однако основные результаты в рамках данной концепции получены для систем со скалярным управлением [5, 6].

В данной статье концепция адаптивного управления с модельной координацией распространяется на составные системы, содержащие локальные MIMO-подсистемы. Принимается допущение, что локальным контроллерам доступна информация о локальном векторе состояния подсистемы и о векторах состояния эталонных моделей всех локальных подсистем. Для адаптации локальных контроллеров к неопределенности параметрических и внешних возмущений в каждой локальной подсистеме предлагается использовать идентификатор, выдающий текущие оценки параметров. Известно, что требование обеспечения точности оценок неизвестных возмущений является достаточно жестким и недостижимым на практике [7]. В [8—10] обосновано, что обеспечение заданной точности слежения адаптивной системы за эталонной моделью не зависит напрямую от точности выдаваемых идентификатором оценок параметров. Если текущие оценки параметров удовлетворяют одному из совокупности структурных условий, то ошибка слежения за эталоном определяется нормой невязки идентификации, которая используется в большин-

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00125-а).

стве рекуррентных алгоритмов идентификации и обладает быстрой сходимостью в окрестность нуля. Это свойство невязки идентификации и определяет быстроту и простоту достижения условий адаптируемости в системе с идентификатором и эталонной моделью. В данной статье подход к адаптивному управлению [8—10] распространяется на схемы децентрализованного управления.

Рамки решаемой задачи ограничиваются линейными нестационарными системами с непрерывным временем с параметрической неопределенностью и неконтролируемыми внешними возмущениями.

В качестве методической основы решения используются результаты технологии вложения систем [11].

Постановка задачи. Задан многосвязный объект управления, состоящий из M взаимосвязанных локальных подсистем

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i(t) = \sum_{j=1}^{M} \mathbf{A}_{ij}(t)\boldsymbol{x}_j(t) + \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_i(t) + \mathbf{S}_i(t)\boldsymbol{w}_i(t),$$
$$\boldsymbol{x}_i(0) = \boldsymbol{x}_{i0},\ i = \overline{1, M}, \qquad (1)$$

где i — номер подсистемы; $\boldsymbol{x}_i(t) \in \Re^{n_i}$ — локальный вектор состояния, доступный измерению; $\boldsymbol{u}_i(t) \in \Re^{m_i}$ — локальный вектор управления объектом; $\boldsymbol{w}_i(t) \in \Re^{s_i}$ — вектор неконтролируемых внешних возмущений; $\mathbf{A}_{ij}$ и $\mathbf{S}_i$ — матрицы заданных размеров, параметры которых являются в общем случае вещественными функциями времени и содержат неопределенность; $\mathbf{B}_i$ — матрица с известными вещественными коэффициентами полного столбцевого ранга ($\operatorname{rank}\mathbf{B}_i = m_i$). Для i-й подсистемы матрица $\mathbf{A}_{ii}$ описывает внутренние взаимосвязи локальной подсистемы, а матрицы $\mathbf{A}_{ij}$ ($j = \overline{1, M}$, $j \neq i$) — ее внешние взаимосвязи с другими подсистемами.

Требования к качеству управления в локальных подсистемах формализуются в виде автономных эталонных моделей

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{ri}(t) = \mathbf{A}_{ri}(t) + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}(t),\ \boldsymbol{x}_{ri}(0) = \boldsymbol{x}_{ri0},\ i = \overline{1, M}, \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{x}_{ri}(t) \in \Re^{n_i}$ — вектор состояния i-й эталонной модели; $\boldsymbol{u}_{ri}(t) \in \Re^{k_i}$ — вектор задающего воздействия i-й подсистемы; $\mathbf{A}_{ri}$, $\mathbf{B}_{ri}$ — заданные матрицы с известными вещественными коэффициентами. Матрицы $\mathbf{A}_{ri}$ — гурвицевы.

Для формирования управления $\boldsymbol{u}_i(t)$ в каждой i-й подсистеме доступен локальный вектор состояния $\boldsymbol{x}_i(t)$, локальный вектор задающего воздействия $\boldsymbol{u}_{ri}(t)$ и векторы состояния всех эталонных моделей $\boldsymbol{x}_{r1}(t)$, $\boldsymbol{x}_{r2}(t)$ ... $\boldsymbol{x}_{rM}(t)$. Для определения управления используются выдаваемые идентификатором оценки параметров. В качестве алгоритма текущей идентификации в каждой из локальных подсистем используется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [12], который для i-й подсистемы имеет вид:

$$(\hat{\mathbf{A}}_i)_k = (\hat{\mathbf{A}}_i)_{k-1} + (\boldsymbol{\varepsilon}_i)_k(\boldsymbol{y}_{iF}^{\mathrm{T}})_k(\mathbf{R}_i)_k,\ i = \overline{1, M}, \qquad (3)$$

где k — квантор времени; $\hat{\mathbf{A}}_i = [\hat{\mathbf{A}}_{i1}\ \hat{\mathbf{A}}_{i2} \ldots \hat{\mathbf{A}}_{ii} \ldots \hat{\mathbf{A}}_{iM}]$ — блочная матрица оценок параметров; $\boldsymbol{y}_{iF}(t) \in \Re^n$ ($n = \sum_{i=1}^{M} n_i$) — вектор факторов; $\boldsymbol{\varepsilon}_i \in \Re^{n_i}$ — вектор невязок идентификации; $\mathbf{R}_i$ — положительно определенная матрица коэффициентов усиления идентификатора. Алгоритм для вычисления $\mathbf{R}_i$ приведен в [12, с. 266]. Перед поступлением в идентификатор компоненты локального вектора состояния объекта и векторы состояния эталонных моделей пропускаются через фильтр низких частот $F(s)$:

$$f_i(s)\boldsymbol{y}_{iF}^{\mathrm{T}}(t) =$$
$$= [\boldsymbol{x}_{r1}^{\mathrm{T}}(t)\ \boldsymbol{x}_{r2}^{\mathrm{T}}(t) \ldots \boldsymbol{x}_{ri-1}^{\mathrm{T}}(t)\ \boldsymbol{x}_i^{\mathrm{T}}(t)\ \boldsymbol{x}_{ri+1}^{\mathrm{T}}(t) \ldots \boldsymbol{x}_{rM}^{\mathrm{T}}(t)],$$

$$F_i(s) = \frac{1}{f_i(s)} = \frac{1}{f_{ig_i}s^{g_i} + f_{i(g_i-1)}s^{g_i-1} + \ldots + 1}.$$

Здесь $s = d/dt$ — оператор дифференцирования по времени. Все корни вещественного полинома степени не ниже единицы $f_i(s)$ имеют отрицательные вещественные части. Правым нижним индексом "F" будет обозначаться сигнал, обработанный с помощью фильтра $F(s)$. Таким образом, при формировании для i-й подсистемы вектора факторов $\boldsymbol{y}_{iF}(t)$ используются доступные в этой подсистеме локальный вектор состояния $\boldsymbol{x}_i(t)$ и векторы состояния эталонных моделей всех других подсистем.

Вектор невязок идентификации $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ в (3) вычисляется по формуле

$$(\boldsymbol{\varepsilon}_i)_k = (\boldsymbol{z}_i)_k - (\hat{\mathbf{A}}_i)_{k-1}(\boldsymbol{y}_{iF})_k - \mathbf{B}(\boldsymbol{u}_{iF})_k;$$

$$f(s)\boldsymbol{z}_i(t) = s\boldsymbol{x}_i(t) \text{ или } \boldsymbol{z}_i = sF(s)\boldsymbol{x}_i = s\boldsymbol{x}_{iF} = \dot{\boldsymbol{x}}_{iF}. \qquad (4)$$

Здесь $sF(s)$ — фильтр высоких частот, предназначенный для выделения из сигнала $\boldsymbol{x}_i(t)$ низкочастотной составляющей производной $\dot{\boldsymbol{x}}_{iF}(t)$. Вычисление сигнала производной $\dot{\boldsymbol{x}}_{iF}(t)$ необходимо для работы алгоритма идентификации. Заметим, что фильтр $sF(s)$ — технически реализуем.

Для удобства изложения перейдем от дискретной к непрерывной форме представления алгоритма

текущей идентификации. Такой переход корректен в предположении малости шага дискретизации в сравнении с периодом переходных процессов в системе управления

$$\dot{\hat{\mathbf{A}}}_i(t) \approx \boldsymbol{\varepsilon}_i(t)\boldsymbol{y}_{iF}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{R}_i(t); \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) = \dot{\boldsymbol{x}}_{iF}(t) - \hat{\mathbf{A}}_i\boldsymbol{y}_{iF}(t) - \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_{iF}(t). \qquad (6)$$

Как было отмечено выше, сходимость к истинным значениям оценок параметров достигается при более сложных условиях, чем сходимость к нулю невязки идентификации. Из равенства $\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) \approx 0$ еще не следует равенства $\hat{\mathbf{A}}_i \approx \mathbf{A}_i$. Будем полагать, что алгоритм текущей идентификации (5), (6) обеспечивает на всем промежутке времени справедливость неравенства

$$|\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)| < \delta_i,$$

где $|\cdot|$ — обозначение векторной нормы, δ_i — некоторое положительное число, характеризующее требования к алгоритму идентификации. Данное условие нетрудно выполнить на практике за счет выбора соответствующего шага дискретизации и поддержания с помощью фактора забывания не ниже некоторого заданного значения нормы положительно определенной матрицы $\mathbf{R}_i$. Подробный анализ условий ограниченности невязки $\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)$ приведен в [10].

Необходимо найти условия существования и алгоритмы формирования управлений локальными подсистемами, обеспечивающие выполнение целевого условия

$$|\boldsymbol{e}_i(t)| < \beta_i,\ t \in [0\ \infty[,\ i = \overline{1, M},\ \boldsymbol{e}_i(t) = \boldsymbol{x}_i(t) - \boldsymbol{x}_{ri}(t), \qquad (7)$$

где $\boldsymbol{e}_i(t)$ — ошибка слежения i-й подсистемы за локальной эталонной моделью; β_i — положительное число, характеризующее заданную точность слежения.

Для определения условий разрешимости задачи используется метод канонизации матриц [11]. Поясним некоторые понятия метода канонизации, используемые в работе.

Левым (правым) делителем нуля максимального ранга матрицы $\mathbf{B}$ размера $n \times m$ и ранга r называется матрица $\overline{\mathbf{B}}^L$ ($\overline{\mathbf{B}}^R$) ранга $n - r$ ($m - r$), удовлетворяющая тождеству

$$\overline{\mathbf{B}}^L\mathbf{B} = 0_{(n-r)\times m}\ (\mathbf{B}\overline{\mathbf{B}}^R = 0_{n\times(m-r)}).$$

Если матрица $\mathbf{B}$ — полного строчечного (столбцового) ранга, то имеет место равенство $\overline{\mathbf{B}}^L = 0$ ($\overline{\mathbf{B}}^R = 0$) и существует правый $\mathbf{B}^R$ (левый $\mathbf{B}^L$) односторонний делитель единицы:

$$\mathbf{B}\mathbf{B}^R = \mathbf{I}_n\ (\mathbf{B}^L\mathbf{B} = \mathbf{I}_m),$$

где $\mathbf{I}_n$ — единичная матрица размера $n \times n$. Делители единицы обладают свойством регулярности по Нейману:

$$\mathbf{B}^R\mathbf{B}\mathbf{B}^R = \mathbf{B}^R,\ \mathbf{B}\mathbf{B}^R\mathbf{B} = \mathbf{B},\ \mathbf{B}^L\mathbf{B}\mathbf{B}^L = \mathbf{B}^L,\ \mathbf{B}\mathbf{B}^L\mathbf{B} = \mathbf{B}.$$

При практическом вычислении делителей нуля и делителей единицы можно использовать сингулярное разложение.

Условия точного слежения и множества компенсируемых возмущений. Определим необходимые и достаточные условия, при выполнении которых возможно точное слежение подсистем (1) за эталонными моделями (2) в условиях полной определенности. При неполноте информации эти условия будут играть роль необходимых (но недостаточных) условий. Сформулируем их в виде леммы, доказательство которой приведено в приложении 1.

Лемма 1. Для объекта управления (1) в условиях полной определенности точное слежение за локальными эталонными моделями (2) при совпадении начальных состояний объекта и эталонных моделей, любых известных задающих воздействиях и шумах возможно тогда и только тогда, когда выполняются каждое из условий

$$\overline{\mathbf{B}}_i^L(\mathbf{A}_{ri} - \mathbf{A}_{ii}) = 0,\ \overline{\mathbf{B}}_i^L\mathbf{A}_{ij} = 0,\ \overline{\mathbf{B}}_i^L\mathbf{S}_i = 0,\ \overline{\mathbf{B}}_i^L\mathbf{B}_{ri} = 0,$$
$$i = \overline{1, M},\ j = \overline{1, M}\ j \neq i. \qquad (8)$$

Условия (8) являются аналогом известных ранговых условий Эрзбергера. Они накладывают ограничения на структуры объекта управления (1) и эталонной модели (2). Проверка их справедливости не требует полной определенности параметров матриц $\mathbf{A}_{ii}$, $\mathbf{A}_{ij}$, $\mathbf{S}_i$. Например, если матрица $\mathbf{B}_i$ — квадратная и невырожденная, то (8) выполняются всегда при любых $\mathbf{A}_{ii}$, $\mathbf{A}_{ij}$, $\mathbf{S}_i$, $\mathbf{A}_{ri}$ и $\mathbf{B}_{ri}$, так как в этом случае $\overline{\mathbf{B}}_i^L = 0$.

В дальнейшем будем полагать, что условия (8) выполняются.

Представим каждый из блоков матриц $\mathbf{A}_{ii}$, $\mathbf{A}_{ij}$ в виде суммы

$$\mathbf{A}_{ii} = \mathbf{A}_{0ii} + \Delta\mathbf{A}_{ii},\ \mathbf{A}_{ij} = \mathbf{A}_{0ij} + \Delta\mathbf{A}_{ij},$$

где $\mathbf{A}_{0ii}$ и $\mathbf{A}_{0ij}$ включают априорно известные параметры матриц $\mathbf{A}_{ii}$ и $\mathbf{A}_{ij}$, а $\Delta\mathbf{A}_{ii}$ и $\Delta\mathbf{A}_{ij}$ — матрицы произвольных неизвестных параметрических возмущений. Следующая лемма раскрывает вопрос о множествах параметрических возмущений $\Delta\mathbf{A}_{ii}$ и $\Delta\mathbf{A}_{ij}$, которые могут быть компенсированы в системе. Доказательство леммы приведено в приложении 2.

Лемма 2. С помощью неограниченных управлений $\boldsymbol{u}_i$ в (1) компенсируются такие и только такие

произвольные возмущения $\Delta\mathbf{A}_{ii}$ и $\Delta\mathbf{A}_{ij}$, которые принадлежат множествам

$$\{\Delta\mathbf{A}_{ii}\}_{\mathbf{\Lambda}_{ii}} = \mathbf{B}_i\mathbf{\Lambda}_{ii},\ \{\Delta\mathbf{A}_{ij}\}_{\mathbf{\Lambda}_{ij}} = \mathbf{B}_i\mathbf{\Lambda}_{ij}, \qquad (9)$$

где $\mathbf{\Lambda}_{ii}$ и $\mathbf{\Lambda}_{ij}$ — матрицы размеров $m_i \times n_i$ и $m_i \times n_j$ соответственно с произвольными элементами, являющимися в общем случае вещественными функциями времени.

Здесь и далее в нижних индексах при фигурных скобках множеств указаны варьируемые матрицы, порождающие все элементы этих множеств.

В дальнейшем будем полагать, что неизвестные параметрические возмущения в системе принадлежат множествам (9).

Основное решение. Сформулируем решение поставленной задачи в виде теоремы и ее следствий, доказательства которых приведены в приложениях 3, 4.

Теорема. Для объекта управления (1), эталонных моделей (2), алгоритма текущей идентификации (5), (6) при выполнении условий (8), (9), использовании законов управления локальными подсистемами

$$\boldsymbol{u}_i = \mathbf{B}_i^L\left[(\mathbf{A}_{ri} - \hat{\mathbf{A}}_{ii})\boldsymbol{x}_{iF} - \sum_{j=1}^{M}\hat{\mathbf{A}}_{ij}\boldsymbol{x}_{rjF} + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}\right],$$
$$i = \overline{1, M},\ j \neq i, \qquad (10)$$

и удовлетворении оценками параметров условий

$$\overline{\mathbf{B}}_i^L(\mathbf{A}_{ri} - \hat{\mathbf{A}}_{ii}) = 0,\ \overline{\mathbf{B}}_i^L\hat{\mathbf{A}}_{ij} = 0,$$
$$i = \overline{1, M},\ j = \overline{1, M},\ j \neq i, \qquad (11)$$

динамика каждой из локальных подсистем описывается уравнением

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = \left\{\mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i - (\mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i)_F + \sum_{j=1}^{M}\hat{\mathbf{A}}_{ij}\boldsymbol{x}_j - \sum_{j=1}^{M}(\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j)_F + \right.$$
$$\left. + \mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i - (\mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i)_F\right\} + \boldsymbol{\varepsilon}_i + \mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{x}_{iF} + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri},$$
$$i = \overline{1, M},\ j \neq i. \qquad (12)$$

Из дифференциальных уравнений (12) сделать вывод о выполнимости целевого условия (7) затруднительно. Обратимся к некоторым частным случаям.

Рассмотрим идеальный случай, когда фильтр $F(s) = 1$.

Следствие 1. В условиях теоремы при $F(s) = 1$ динамика ошибки слежения в замкнутых локальных подсистемах описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i - \mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{e}_i = \boldsymbol{\varepsilon}_i,\ i = \overline{1, M}. \qquad (13)$$

Из (13) следует, что при диагонализируемой матрице $\mathbf{A}_{ri}$ справедливо неравенство [13, с. 72]:

$$|\boldsymbol{e}_i(t)| < \frac{\delta_i}{\sigma_i}\|\mathbf{T}_i\|\,\|\mathbf{T}_i^{-1}\|,\ t \in [0, \infty[, \qquad (14)$$

где $\|\cdot\|$ — какая-либо матричная норма $\mathbf{A}_{ri} = \mathbf{T}_i^{-1}\mathbf{D}_i\mathbf{T}_i$; $\mathbf{D}_i$ — диагональная матрица; σ_i — степень устойчивости матрицы $\mathbf{A}_{ri}$. Тогда для выполнения целевого условия (7) необходимо за счет выбора эталонных моделей и настройки алгоритма текущей идентификации обеспечить справедливость неравенства

$$\frac{\delta_i}{\sigma_i}\|\mathbf{T}_i\|\,\|\mathbf{T}_i^{-1}\| \leqslant \beta_i.$$

Как следует из (4), при $F(s) = 1$ требуется вычисление идеальной производной $\dot{\boldsymbol{x}}_i$. Это невыполнимо на практике.

Рассмотрим еще один случай. Пусть объект управления (1) является низкочастотным, и фильтр низких частот $F(s)$ выбран таким образом, что

$$\mathbf{A}_{ri}(\boldsymbol{x}_{iF}(t) - \boldsymbol{x}_i(t)) = \mathbf{A}_{ri}\Delta\boldsymbol{x}_i(t),\ |\mathbf{A}_{ri}\Delta\boldsymbol{x}_i(t)| < \vartheta_i,$$
$$t \in [0\ \infty[, \qquad (15)$$

где ϑ_i — положительное число, характеризующее близость сигналов $\boldsymbol{x}_i(t)$ и $\boldsymbol{x}_{iF}(t)$. Заметим, что в (12) сигнал

$$\mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i - (\mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i)_F + \sum_{j=1}^{M}\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j - \sum_{j=1}^{M}(\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j)_F + \mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i - (\mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i)_F,$$
$$i = \overline{1, M},\ j \neq i,$$

эквивалентен сигналу $\dot{\boldsymbol{x}}_i = \mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i + \sum_{j=1}^{M}\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j + \mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i$, пропущенному через фильтр высоких частот $1 - F(s)$. В силу низкочастотности объекта управления (1) положим, что на всем промежутке времени работы системы выполняется неравенство

$$|\dot{\boldsymbol{x}}_i - \dot{\boldsymbol{x}}_{iF}| < \alpha_i,\ t \in [0\ \infty[, \qquad (16)$$

где α_i — некоторое положительное число, характеризующее ограниченность сигналов объекта управления в области высоких частот.

Сформулируем еще одно следствие теоремы.

Следствие 2. В условиях теоремы при выборе фильтра низких частот $F(s)$ таким образом, что выполняются свойства (15) и (16), динамика ошибки слежения в замкнутых локальных подсистемах описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i - \mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{e}_i \approx \boldsymbol{\varepsilon}_i + \mathbf{A}_{ri}\Delta\boldsymbol{x}_i + \dot{\boldsymbol{x}}_i - \dot{\boldsymbol{x}}_{iF},\ i = \overline{1, M}. \qquad (17)$$

Из (17) по аналогии с (14) можно вычислить оценку точности слежения

$$|\boldsymbol{e}_i(t)| < \frac{\delta_i + \alpha_i + \vartheta_i}{\sigma_i} \|\mathbf{T}_i\| \, \|\mathbf{T}_i^{-1}\|, \; t \in [0 \; \infty[. \qquad (18)$$

Доказательство следствия 2 осуществляется по аналогии с доказательством следствия 1. Сигнал $\mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{x}_{iF}(t)$ в (12) заменяется на сумму $\mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{x}_i(t) + \mathbf{A}_{ri}\Delta\boldsymbol{x}_i(t)$.

Методика синтеза применима для объектов управления с полосой пропускания в области низких частот в смысле существования фильтра $F(s)$, обеспечивающего справедливость неравенств (15), (16). Она включает следующие этапы:

1. Проверка структурных условий (8). Исходя из их выполнения и требований к системе определяются параметры эталонных моделей $\mathbf{A}_{ri}$ и $\mathbf{B}_{ri}$. В соответствии с (9) проверяется принадлежность неизвестных параметров системы множествам компенсируемых возмущений.

2. Выбор фильтра $F(s)$, обеспечивающего справедливость неравенств условие (15), (16).

3. Экспериментальная настройка алгоритма идентификации (3), в качестве которого можно использовать рекуррентный метод наименьших квадратов, в целях обеспечения ограниченности невязки идентификации $|\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)| < \delta_i$. Настройка идентификатора осуществляется за счет выбора фактора забывания из диапазона 0,97...0,99 [12], а также начального значения $(\mathbf{R}_i)_0$.

4. Вычисление управления по формуле (10).

Пример. Рассмотрим объект управления, состоящий из двух локальных подсистем

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \\ \hline \dot{x}_{21} \\ \dot{x}_{22} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc:cc} -3+\sin t & -2-\sin(0{,}5t) & 1+0{,}1t+0{,}05t^2 & -2-\sin(0{,}3t) \\ -0{,}1t+0{,}05t^2 & 2-0{,}2t & 3-0{,}2t & 2+0{,}1t-0{,}01t^2 \\ \hdashline 1-0{,}2t & -0{,}1t+0{,}03t^2 & 2+\sin(0{,}5t) & -0{,}1t+0{,}03t^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}\right] \times$$

$$\times \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \hline x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{cc:c} 2 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ \hdashline 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{array}\right] \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ \hdashline u_{21} \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c:c} 1+0{,}1t & 0 \\ \sin(0{,}3t) & 0 \\ \hdashline 0 & 1-0{,}1t \\ 0 & 0 \end{array}\right] \begin{bmatrix} w_1 \\ \hline w_2 \end{bmatrix}. \qquad (19)$$

Эталонные модели имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{r11} \\ \dot{x}_{r12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1{,}6 & 0{,}3 \\ -1{,}8 & -0{,}1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{r11} \\ x_{r12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_{r1};$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{r21} \\ \dot{x}_{r22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & -3 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{r21} \\ x_{r22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_{r2}.$$

Пусть у объекта управления все параметры четвертой строки известны.

В первой подсистеме матрица $\mathbf{B}_1$ — квадратная и невырожденная, поэтому $\overline{\mathbf{B}}_1^L = 0$ и условия (8) выполняются для любых параметров матриц $\mathbf{A}_{11}$, $\mathbf{A}_{12}$, $\mathbf{A}_{r1}$, $\mathbf{B}_{r1}$. В соответствии с (9) все параметры матриц $\mathbf{A}_{11}$ и $\mathbf{A}_{12}$ принадлежат множествам компенсируемых возмущений и поэтому могут быть неизвестны, иметь произвольные значения или функциональные зависимости. Для второй подсистемы запишем матрицу $\mathbf{B}_2$ и ее левый делитель нуля:

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \; \overline{\mathbf{B}}_2^L = [0 \; 1].$$

Нетрудно проверить, что условия (8) при выбранной структуре эталонной модели выполняются. По формуле (9) вычисляем множества компенсируемых возмущений

$$\{\Delta\mathbf{A}_{22}\}_{\boldsymbol{\Lambda}_{22}} = \mathbf{B}_2\boldsymbol{\Lambda}_{22} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} [\lambda_1(t) \; \lambda_2(t)] = \begin{bmatrix} 2\lambda_1(t) & 2\lambda_2(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\{\Delta\mathbf{A}_{21}\}_{\boldsymbol{\Lambda}_{21}} = \begin{bmatrix} 2\lambda_3(t) & 2\lambda_4(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\lambda_i(t)$ — произвольные вещественные функции времени. Делаем вывод, что произвольные значения могут принимать только параметры первой строки второй подсистемы, а параметры второй строки должны быть априорно известны.

В качестве фильтра низких частот для обеих подсистем будем использовать апериодическое звено $F(s) = (0{,}03s + 1)^{-1}$.

Векторы факторов для первой и второй подсистем имеют вид

$$\boldsymbol{y}_{1F} = [x_{11F} \; x_{12F} \; x_{r21F} \; x_{r22F}];$$
$$\boldsymbol{y}_{2F} = [x_{r11F} \; x_{r12F} \; x_{21F} \; x_{22F}].$$

Идентифицируются только параметры верхних трех строк матрицы $\mathbf{A}$ в (19) (параметры четвертой строки должны быть известны). Начальные значения для всех оценок параметров принимаются равными нулю. Для настройки алгоритма текущей идентификации зададим для каждой подсистемы фактор забывания 0,98 и начальные значения $(\mathbf{R}_1)_0 = (\mathbf{R}_2)_0 = 100\mathbf{I}_2$.

По формуле (10) вычислим законы управления для каждой из подсистем:

$$\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}5 & 0 \\ -0{,}25 & 0{,}5 \end{bmatrix} \left[\left(\begin{bmatrix} -1{,}6 & 0{,}3 \\ -1{,}8 & -0{,}1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} & \hat{a}_{12} \\ \hat{a}_{21} & \hat{a}_{22} \end{bmatrix} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \begin{bmatrix} x_{11F} \\ x_{12F} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{a}_{13} & \hat{a}_{14} \\ \hat{a}_{23} & \hat{a}_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{r21F} \\ x_{r22F} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_{r1} \right];$$

$$u_{21} = \left[\frac{1}{2} \vdots 0\right]\left[\left(\begin{bmatrix}-3 & -3\\ 1 & 0\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\hat{a}_{33} & \hat{a}_{34}\\ 1 & 0\end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix}x_{21F}\\ x_{22F}\end{bmatrix} -\right.$$

$$\left. - \begin{bmatrix}\hat{a}_{31} & \hat{a}_{32}\\ 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{r11F}\\ x_{r12F}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix} u_{r2}\right] = \frac{1}{2}\left((-3 - \hat{a}_{33})x_{21F} + \right.$$

$$\left. + (-3 - \hat{a}_{34})x_{22F} - \hat{a}_{31}x_{r11F} - \hat{a}_{32}x_{r12F} + u_{r2}\right),$$

где $\hat{a}_{ij}$ — выдаваемые идентификатором в текущем времени оценки соответствующих параметров матрицы **A** в (19).

На рис. 1 приведены переходные процессы в замкнутой системе при отсутствии внешних шумов. На каждую из подсистем поступают задающие воздействия u_{r1} и u_{r2}. На рис. 1 приводятся графики невязок идентификации для первой ε_{11}, ε_{12} и второй ε_{21} подсистем, выраженные в процентах от максимальных значений $\dot{x}_{11F}$, $\dot{x}_{12F}$ и $\dot{x}_{21F}$ соответственно. Как видно, невязки идентификации не превышают нескольких процентов. Начальные условия эталонных моделей нулевые, а объекта управления — ненулевые. Поэтому в первые 2...3 с наблю-

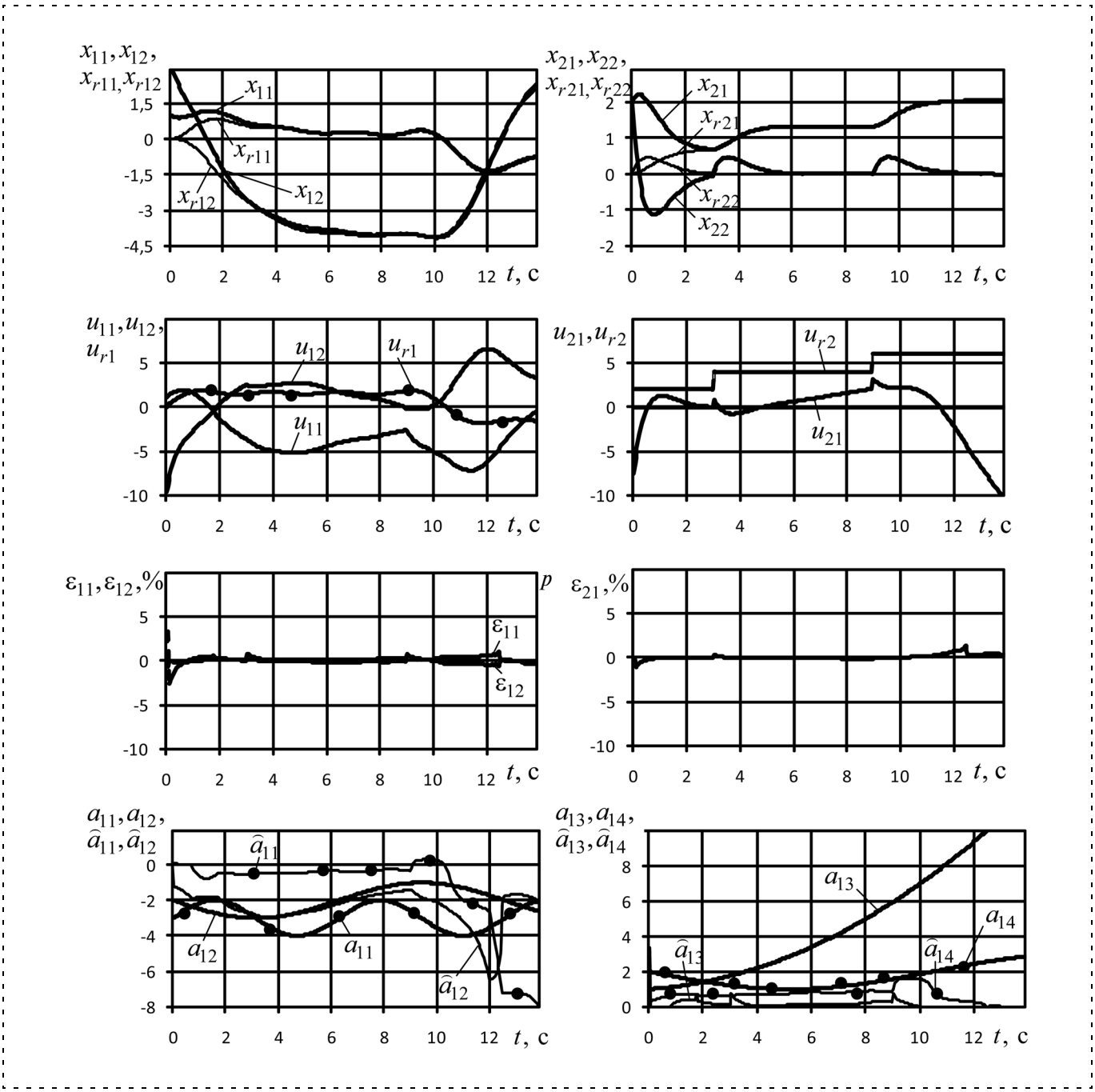


Рис. 1. Переходные процессы в замкнутой системе при отсутствии внешних возмущений

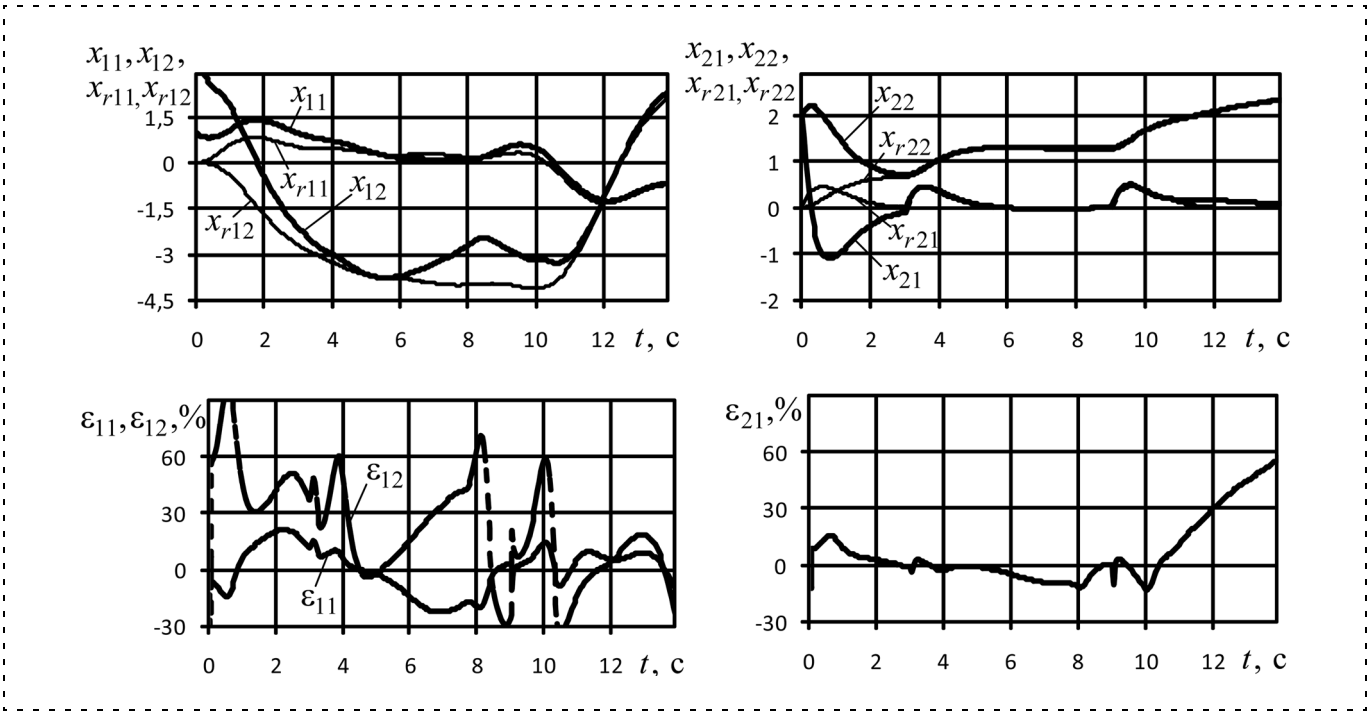


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе при увеличении невязки идентификации

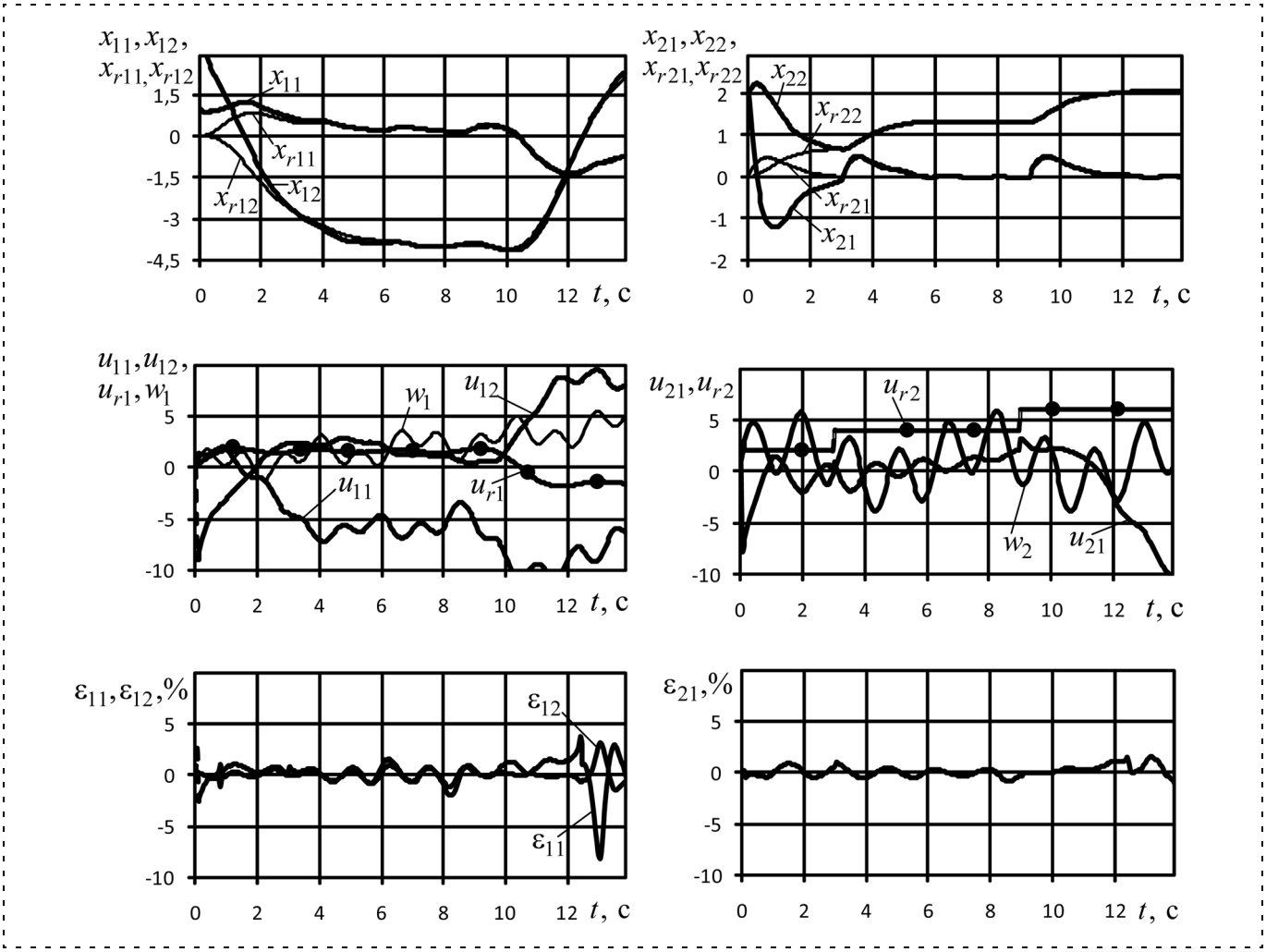


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе при воздействии внешних неконтролируемых возмущений

даем "стягивание" траекторий объекта к эталонным траекториям (отработка начальных условий). Впоследствии наблюдается достаточно точное слежение за эталонными траекториями. Здесь же для примера приведены точные значения параметров первой строки матрицы **A** и их текущие оценки. Видно, что оценки достаточно далеки от истинных значений. При таких интенсивных изменениях параметров не обеспечиваются условия сходимости оценок. Тем не менее, управление обеспечивает системе желаемые свойства, что подтверждает полученные теоретические выводы.

Теперь рассмотрим те же процессы, но при больших значениях невязки идентификации (рис. 2). Для этого увеличим до значения 0,998 фактор забывания в алгоритме текущей идентификации. При таком значении фактора забывания нормы матриц $\mathbf{R}_i$ существенно меньше, чем в первом случае, поэтому невязки идентификации становятся больше [10]. Из рис. 2 видно, что качество слежения по сравнению с рис. 1 ухудшилось. Заметим, что самые большие значения принимает невязка ε_{12}, и поэтому именно по координате x_{12} наблюдается наихудшее слежение.

На рис. 3 приводятся те же процессы, но при дополнительных воздействиях неконтролируемых шумов w_1 и w_2. Видно, что невязки идентификации по сравнению с рис. 1 возросли, ошибки слежения увеличились, но по-прежнему ограничены. Увеличение ошибок слежения связано с наличием высокочастотной составляющей шумов, т. е. увеличением α_i в (16). При понижении высокочастотных составляющих шумов точность слежения увеличивается.

Заключение. Рассмотренный подход к адаптивному децентрализованному управлению применим для нестационарных объектов (1) с ограниченной полосой сигналов в области высоких частот (16). В этом случае при выполнении структурных условий (8), (11), принадлежности неизвестных параметрических возмущений множествам (9) адаптивные законы управления (10), основанные на текущих оценках неизвестных параметров, обеспечивают слежение за траекториями локальных эталонных моделей (2) с ошибкой, пропорциональной сумме значений положительных вещественных чисел α_i ($|\dot{\boldsymbol{x}}_i - \dot{\boldsymbol{x}}_{iF}| < \alpha_i$), ϑ_i ($|\mathbf{A}_{ri}(\boldsymbol{x}_{iF}(t) - \boldsymbol{x}_i(t))| < \vartheta_i$) и δ_i ($|\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)| < \delta_i$). При этом к идентификатору не предъявляется практически невыполнимое требование сходимости оценок параметров к истинным значениям. Достаточно лишь, чтобы алгоритм текущей идентификации обеспечивал сходимость в некоторую область в окрестности нуля невязки идентификации $|\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)| < \delta_i$.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Получим уравнение, описывающее динамику ошибки слежения. Из (7) с учетом (1) и (2) получаем для i-й подсистемы

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i(t) = \dot{\boldsymbol{x}}_i(t) - \dot{\boldsymbol{x}}_{ri}(t) = \sum_{j=1}^{M} \mathbf{A}_{ij}(t)\boldsymbol{x}_j(t) + \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_i(t) + \\ + \mathbf{S}_i(t)\boldsymbol{w}_i(t) - \mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{x}_{ri}(t) - \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}(t).$$

Добавим и отнимем от правой части последнего равенства произведение $\mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{x}_i(t)$. После группировки приходим к равенству

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i(t) - \mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{e}_i(t) = (\mathbf{A}_{ii} - \mathbf{A}_{ri})\boldsymbol{x}_i(t) + \sum_{j=1}^{M} \mathbf{A}_{ij}(t)\boldsymbol{x}_j(t) + \\ + \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_i(t) + \mathbf{S}_i(t)\boldsymbol{w}_i(t) - \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}(t),\ j \neq i. \qquad (\text{П}.1)$$

В силу гурвицевости матрицы $\mathbf{A}_{ri}$ левая часть (П.1) представляет асимптотически устойчивое дифференциальное уравнение с нулевыми начальными условиями (по условиям леммы $\boldsymbol{x}_{ri}(0) = \boldsymbol{x}_i(0)$). Поэтому из (П.1) следует, что на всем промежутке времени работы системы $\boldsymbol{e}_i(t) = 0$ тогда и только тогда, когда выполняется равенство

$$(\mathbf{A}_{ii} - \mathbf{A}_{ri})\boldsymbol{x}_i(t) + \sum_{j=1}^{M} \mathbf{A}_{ij}(t)\boldsymbol{x}_j(t) + \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_i(t) + \\ + \mathbf{S}_i(t)\boldsymbol{w}_i(t) - \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}(t) = 0,\ j \neq i.$$

Рассмотрим это равенство как уравнение относительно вектора управления $\boldsymbol{u}_i$:

$$\mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_i(t) = (\mathbf{A}_{ri} - \mathbf{A}_{ii})\boldsymbol{x}_i(t) - \sum_{j=1}^{M} \mathbf{A}_{ij}(t)\boldsymbol{x}_j(t) - \\ - \mathbf{S}_i(t)\boldsymbol{w}_i(t) + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}(t),\ j \neq i. \qquad (\text{П}.2)$$

Согласно [11, с. 80] уравнение (П.2) разрешимо тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\overline{\mathbf{B}}_i^L \Bigg[(\mathbf{A}_{ri} - \mathbf{A}_{ii})\boldsymbol{x}_i(t) - \sum_{j=1}^{M} \mathbf{A}_{ij}(t)\boldsymbol{x}_j(t) - \\ - \mathbf{S}_i(t)\boldsymbol{w}_i(t) + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}(t) \Bigg] = 0,\ j \neq i.$$

По условиям леммы значения вектора состояния, возмущения и задающего воздействия могут быть произвольными. Поэтому последнее условие распадается на четыре условия (8).

Приложение 2. Запишем левое равенство (8) в виде

$$\overline{\mathbf{B}}_i^L (\mathbf{A}_{ri} - \mathbf{A}_{0ii} - \Delta\mathbf{A}_{ii}) = 0. \qquad (\text{П}.3)$$

Для разрешимости задачи синтеза это условие должно выполняться при любых возмущениях $\Delta\mathbf{A}_{ii}$, в том числе нулевых. При $\Delta\mathbf{A}_{ii} = 0$ из (П.3) получаем равенство

$$\overline{\mathbf{B}}_i^L(\mathbf{A}_{ri} - \mathbf{A}_{0ii}) = 0. \qquad (\text{П.4})$$

Из сравнения (П.3) и (П.4) делаем вывод о справедливости равенства

$$\overline{\mathbf{B}}_i^L \Delta\mathbf{A}_{ii} = 0.$$

Из свойств левых делителей нуля получаем, что все множество произвольных компенсируемых возмущений $\Delta\mathbf{A}_{ii}$ описывается левой формулой (9). По аналогии определяется множество (9) для возмущения $\Delta\mathbf{A}_{ij}$.

Приложение 3. Подставим закон управления (10) в уравнение объекта управления (1). При выполнении условий (11) и (8) справедлива цепочка равенств

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = \mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i + \sum_{j=1}^{M}\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j + \mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i + \mathbf{B}_i\mathbf{B}_i^L\Big[(\mathbf{A}_{ri} - \hat{\mathbf{A}}_{ii})\boldsymbol{x}_{iF} -$$

$$- \sum_{j=1}^{M}\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_{rjF} + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}\Big] = \mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i + \sum_{j=1}^{M}\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j + \mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i +$$

$$+ (\mathbf{A}_{ri} - \hat{\mathbf{A}}_{ii})\boldsymbol{x}_{iF} - \sum_{j=1}^{M}\hat{\mathbf{A}}_{ij}\boldsymbol{x}_{rjF} + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri},\ j \neq i. \qquad (\text{П.5})$$

Из (6) с учетом (1) следует цепочка равенств

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) = \dot{\boldsymbol{x}}_{iF}(t) - \hat{\mathbf{A}}_i\boldsymbol{y}_{iF}(t) - \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_{iF}(t) =$$

$$= \underbrace{(\mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i)_F + \sum_{j=1}^{M}(\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j)_F + (\mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i)_F + \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_{iF}(t)}_{\dot{\boldsymbol{x}}_{iF}(t)} -$$

$$- \underbrace{\hat{\mathbf{A}}_{ii}\boldsymbol{x}_{iF} - \sum_{j=1}^{M}\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_{jF}}_{-\hat{\mathbf{A}}_i\boldsymbol{y}_{iF}(t)} - \mathbf{B}_i\boldsymbol{u}_{iF}(t),\ j \neq i. \qquad (\text{П.6})$$

Выразим из (П.6) сигнал $\hat{\mathbf{A}}_i\boldsymbol{y}_{iF}(t)$:

$$\hat{\mathbf{A}}_{ii}\boldsymbol{x}_{iF} + \sum_{j=1}^{M}\hat{\mathbf{A}}_{ij}\boldsymbol{x}_{jF} =$$

$$= -\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) + (\mathbf{A}_{ii}\boldsymbol{x}_i)_F + \sum_{j=1}^{M}(\mathbf{A}_{ij}\boldsymbol{x}_j)_F + (\mathbf{S}_i\boldsymbol{w}_i)_F,\ j \neq i.$$

Заменяя в (П.5) сигнал $\hat{\mathbf{A}}_i\boldsymbol{y}_{iF}(t)$ на правую часть последнего равенства, приходим к справедливости (12).

Приложение 4. При $F(s) = 1$ уравнение (12) преобразуется к виду

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i = \boldsymbol{\varepsilon}_i + \mathbf{A}_{ri}\boldsymbol{x}_i + \mathbf{B}_{ri}\boldsymbol{u}_{ri}.$$

Вычитая из его левой и правой частей уравнение эталонной модели (2) и учитывая, что $\boldsymbol{e}_i = \boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_{ri}$ и $\dot{\boldsymbol{e}}_i = \dot{\boldsymbol{x}}_i - \dot{\boldsymbol{x}}_{ri}$, приходим к справедливости (13).

Список литературы

1. **Wang S. H., Davison E. J.** On the stabilization of decentralized control systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1973. AC-18. P. 473—478.
2. **Gavel D. T., Siljak D. D.** Decentralized adaptive control: structural conditions for stability // IEEE Trans. Automat. Control. 1989. V. 34. N 3. P. 413—429.
3. **Zecevic A. I., Siljak D. D.** Global low-rank enhancement of decentralized control for large-scale systems // IEEE Trans. Aut. Contr. 2005. V. 50. N 5. P. 740—744.
4. **Wu H.** Decentralized adaptive robust control for a class of large scale systems with uncertainties in the interconnections // Int. J. Control. 2003. V. 76. P. 253—265.
5. **Миркин Б. М.** Адаптивное децентрализованное управление с модельной координацией // Автоматика и телемеханика. 1999. № 1. С. 90—100.
6. **Паршева Е. А., Цыкунов А. М.** Адаптивное децентрализованное управление многосвязными объектами // Автоматика и телемеханика. 2001. № 2. С. 135—148.
7. **Перельман И. И.** Анализ современных методов адаптивного управления с позиций приложения к автоматизации технологических процессов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 3—32.
8. **Буков В. Н., Круглов С. П., Решетняк Е. П.** Адаптируемость линейной динамической системы с идентификатором и эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 1994. № 3. С. 99—107.
9. **Бронников А. М., Круглов С. П.** Упрощенные условия адаптируемости системы управления с идентификатором и эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 1998. № 7. С. 107—117.
10. **Круглов С. Н.** Уточнение условий адаптируемости систем управления с идентификатором и эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2002. № 12. С. 78—91.
11. **Буков В. Н.** Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во науч. лит. Н. Ф. Бочкаревой, 2006.
12. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука, 1991.
13. **Поляк Б. Т., Щербаков П. С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.

УДК 681.511.46

В. А. Терехов, д-р техн. наук, проф.,
А. Н. Никонов, аспирант
СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург
terekhov.valery@gmail.com

Синтез нейрорегулятора нелинейных динамических объектов на основе одной модели бифуркации*

Рассмотрена задача синтеза типового нейросетевого регулятора на примере группы нелинейных моделей с динамикой поведения, не сводимой к линейной. На основе одной из моделей теории локальных бифуркаций формируется обобщенная функция состояния управляемой системы. Регулятор строится на базе многослойной нейронной сети, обучаемой в реальном времени по динамическому алгоритму с использованием вводимой функции состояния, а задача синтеза сводится к расчету ее неизвестных коэффициентов. Результаты работы проверяются путем компьютерного моделирования.

Ключевые слова: *нелинейная динамика, бифуркации, обобщенная модель, макропеременные.*

Введение. Проектирование систем автоматизации и управления производственными процессами и техническими устройствами на основе типовых решений получило широкое распространение. Примерами тому служат типовые ПИД-регуляторы и их модификации, включая "нечеткие" ПИД-регуляторы, в том числе настраиваемые с помощью нейронных сетей. При этом предполагается, как правило, использование в задаче синтеза линеаризованных моделей объекта. Общепринятой является следующая точка зрения: в тех случаях, когда линеаризация модели неосуществима, необходим индивидуальный подход к решению каждой конкретной задачи синтеза нелинейных законов и, соответственно, к построению нелинейного регулятора.

В данной статье анализируется возможность синтеза нелинейных регуляторов для *класса* нелинейных объектов с динамикой поведения, не сводимой к линейной модели. Речь пойдет об объектах с динамическими режимами, близкими к бифуркационным, для которых в некоторых случаях удается использовать известные в теории бифуркаций модели для решения задачи синтеза управления.

Изначально регулятор рассматривается как нелинейное динамическое устройство, обеспечивающее желаемое состояние (режим работы) управляемого нелинейного объекта в изменяющихся условиях его функционирования. Это означает, что регулятор должен быть адаптивным и грубым по отношению к таким изменениям. Свойство адаптивности обеспечивается за счет реализации нелинейных законов управления на базе перестраиваемых аппроксимационных структур, в качестве которых используются многослойные нейронные сети [1, 2].

Работа построена следующим образом. Сначала анализируется группа нелинейных динамических моделей и формулируется постановка решаемой в статье задачи. Затем определяется обобщенная модель системы и ее параметры, характеризующие индивидуальные особенности объекта управления. На ее основе рассчитываются аналитические законы управления (аналитический прототип), затем их реализация с применением искусственных нейронных сетей.

Постановка задачи. Рассмотрим модель динамической системы:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1 - \theta_1 x_2 - x_1(x_1^2 + x_2^2) + d\varepsilon(t); \\ \dot{x}_2 &= \theta_1 x_1 + x_2 - x_2(x_1^2 + x_2^2) - \theta_2 + d\varepsilon(t) + u, \end{aligned} \qquad (1)$$

где x_1, x_2 — динамические переменные; θ_1, θ_2 — параметры модели; $d\varepsilon(t)$ — неконтролируемые возмущения амплитуды d; u — сигнал управления. При $d = 0$ и $u = 0$ модель (1) соответствует системе Ван дер Поля после применения к ней процедуры усреднения [3].

В системе (1) для значений параметров $\theta_1 = 0{,}54$, $\theta_2 = 0{,}52$, $d = 0$ и $u = 0$ существуют два устойчивых динамических режима (цифры *1* и *2* на рис. 1, *а*). Предположим, что режим *2* соответствует выполнению технологической задачи и является желаемым. При наличии в системе неконтролируемых сигнальных возмущений малой величины (например, при $d = 0{,}014$) возможен переход с режима *2* на режим *1* (процесс обозначен цифрой *3* на рис. 1, *а*). Выберем в качестве задачи управления стабилизацию изображающей точки системы (1) в окрестности режима *1* при наличии сигнальных возмущений $d\varepsilon(t)$.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в 2008—2009 гг., проект 08-08-00103-а.

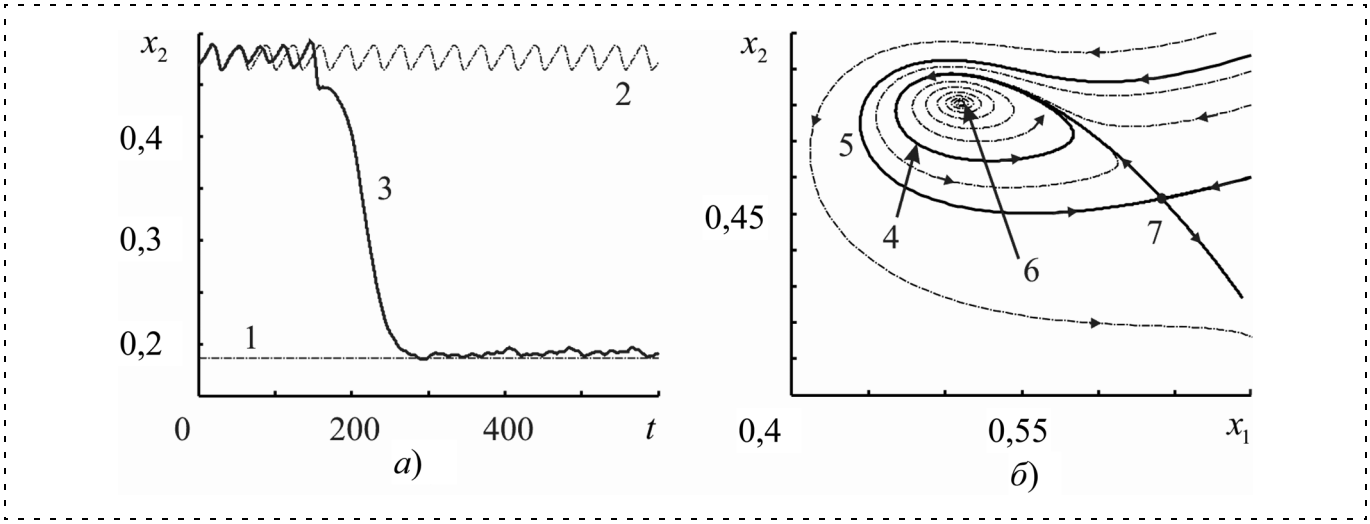


Рис. 1. Динамические режимы системы (1) (*а*) и фазовый портрет системы (1) в окрестности режима (2) (*б*)

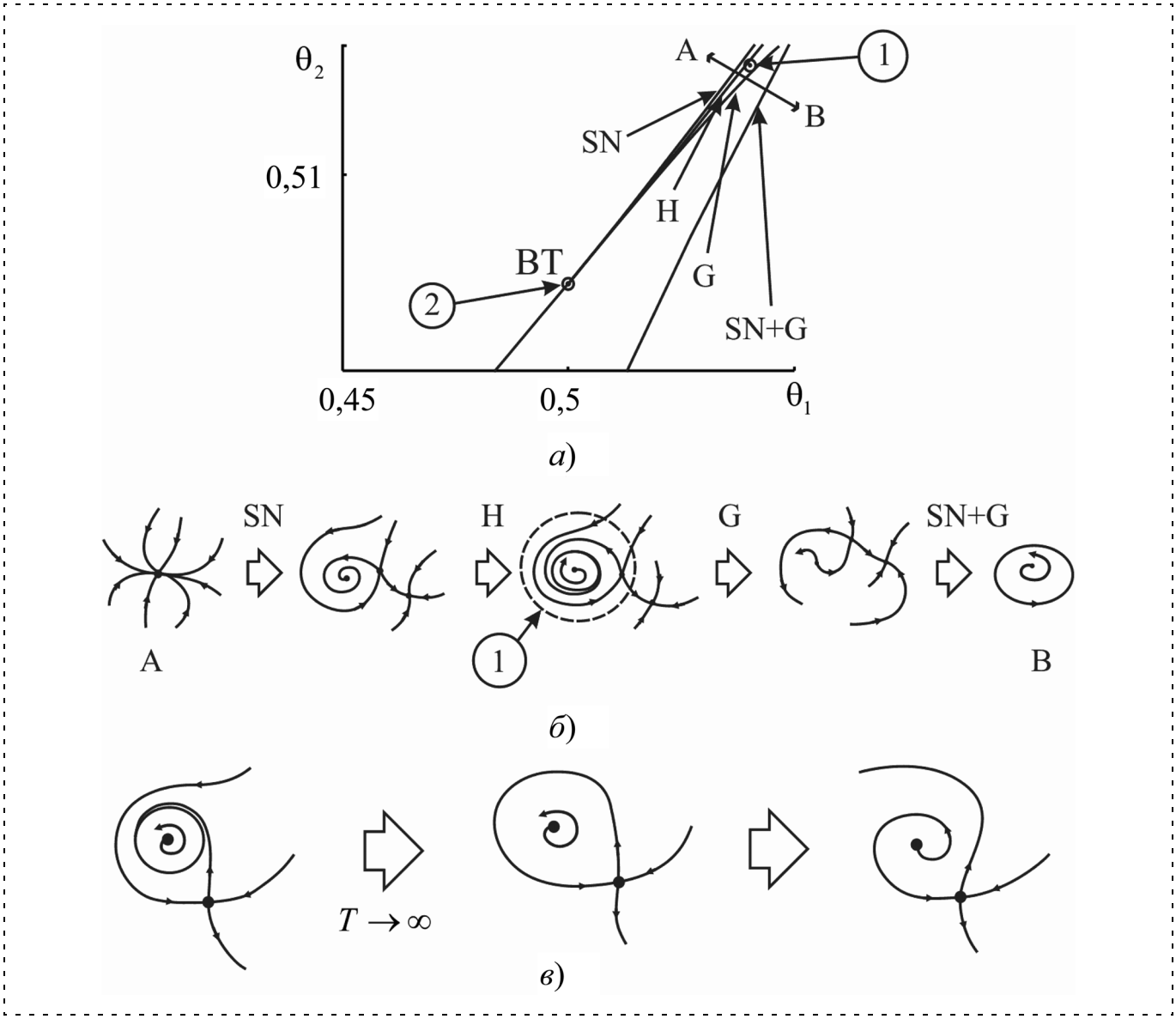


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма для системы (1) (*а*); последовательность бифуркаций и типы фазовых портретов при переходе из области *A* в область *B* (*б*); схематичное изображение гомоклинической бифуркации (*в*)

Переход с режима *2* на режим *1* в системе (1) происходит по причине близкого расположения устойчивого предельного цикла и устойчивого многообразия седла (цифры *4* и *5* на рис. 1, *б*). Подобная ситуация характерна для близких к *бифуркационным* режимам с гомоклиническим замыканием устойчивого и неустойчивого многообразий седловой точки *7*. Приближение к такому режиму при постепенном изменении значения одного из параметров характеризуется затягиванием периода колебаний предельного цикла с последующим превращением в гомоклиническую петлю (рис. 2, *в*).

Помимо гомоклинической в окрестности рассматриваемого состояния обнаруживаются бифуркации "седло—узел" (столкновение фокуса *6* и седла *7*) и Пуанкаре—Андронова—Хопфа (появление предельного цикла вокруг фокуса *6*). В пространстве параметров θ_1 и θ_2 описанные выше бифуркации образуют непрерывные множества, обозначенные на рис. 2, *а* линиями[1]. Они делят плоскость на области с качественно схожим поведением. Точка пересечения таких множеств соответствует бифуркации Богданова—Такенса (точка *2* на рис. 2, *а*). На рис. 2, *а* точка *1* соответствует состоянию системы, изображенному на рис. 1, *а*, *б*.

Отмеченный "бифуркационный узел" BT обнаружен также в ходе анализа модели химической реакции Ивамото и Сено [4]:

$$\begin{aligned} \dot{E} &= k_1 P - k_2 EX - k_7 E; \\ \dot{X} &= k_3 AEX^2 - k_4 EX^3 - k_5 BX + k_6 C - k_8 X, \end{aligned} \qquad (2)$$

где E, X — изменяющиеся во времени значения концентраций веществ; A, B, C, P — концентрации веществ, удерживаемые на постоянном уровне вдали от равновесного состояния; k_1, k_2, ..., k_8 — параметры. Оценивалось влияние изменяемых параметров реакций $k_7 = k_8 = \alpha$ и уровень концентрации вещества P при фиксированных значениях остальных параметров: $A = 1{,}332$; $B = 5{,}02$; $C = 5{,}35$; $k_1 = 0{,}1$; $k_2 = 0{,}476$; $k_3 = 100$; $k_4 = 48{,}64$; $k_5 = 10$; $k_6 = 1$. Модель использовалась для объяснения явлений, происходящих в системе проточного реактора с перемешиванием.

В ходе бифуркационного анализа модели (2) точка Богданова—Такенса может быть обнаружена при значениях[2] $\alpha = 1{,}625$, $P = 17{,}66$ для *стационарной точки*[3] $E = 1{,}0197$, $X = 0{,}225$. Бифуркационная диаграмма малой окрестности этих значений показана на рис. 3, *а*. Цифрой *1* на рис. 3, *а* обозначена область со схожим для системы (1) поведением.

Отметим, что другими исследователями указывается на аналогичные явления в моделях химических реакторов [5] и динамики плотности биологических популяций [6]. Это означает, что существует ряд нелинейных моделей, обладающих *подобным* поведением в некоторой области значений переменных и параметров.

Для описания поведения систем (1), (2) воспользуемся моделью бифуркации Богданова—Такенса [7]:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= \mu_1 + \mu_2 y_2 + a y_1^2 + b y_1 y_2, \end{aligned} \qquad (3)$$

где y_1 и y_2 — динамические переменные; a и b — коэффициенты модели; μ_1 и μ_2 — параметры модели. Бифуркационная диаграмма для модели (3) при $a = 1$, $b = 1$ изображена на рис. 3, *б*. Отметим, что фазовый портрет, изображенный на рис. 3, *б* между линиями G и H, схож с портретами в областях, отмеченных цифрой *1* на рис. 2, *а* и 3, *а*. Отличия в фазовых портретах, позиционируемых в работе как настройки модели, выразим в виде замены координат и параметров:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y} &= \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}),\ \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_b, \boldsymbol{\theta}_b) = \boldsymbol{y}_b; \\ \boldsymbol{\mu} &= \boldsymbol{p}(\boldsymbol{\theta}),\ \boldsymbol{p}(\boldsymbol{\theta}_b) = \boldsymbol{\mu}_b; \end{aligned} \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$, $\boldsymbol{\theta}$, $\boldsymbol{\mu}$ — векторы состояния и параметров исходной системы и модели бифуркации; функции $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta})$, $\boldsymbol{p}(\boldsymbol{\theta})$ задают в малой окрестности точки бифуркации отображение координат и параметров из пространства исходной системы в пространство модели (3); $\boldsymbol{x}_b$, $\boldsymbol{\theta}_b$, $\boldsymbol{y}_b$, $\boldsymbol{\mu}_b$ — бифуркационные значения переменных и параметров. Будем называть систему алгебраических и дифференциальных уравнений (3), (4) *обобщенной моделью* систем (1) и (2).

В работе выполнен синтез нелинейного закона регулирования для системы (1), (2) с использованием обобщенной модели (3), (4). Целью регулирования является создание в фазовом пространстве аттрактора с областью притяжения, отмеченной на рис. 2, 3 цифрой *1*. Достижению такой цели способствует решение следующих задач.

1. Определение неизвестных параметров обобщенной модели (3), (4) в ходе анализа исходных моделей объектов (1) и (2). Результаты анализа служат исходными данными для настройки регулятора.

2. Синтез функции состояния управляемой системы на основе обобщенной модели (3), (4) в целях формализации желаемого поведения замкнутой системы.

---

[1] Здесь и далее на рисунках приняты следующие обозначения бифуркаций: SN — "седло—узел", H — бифуркация Пуанкаре—Андронова—Хопфа; G — гомоклиническая; SN + G — комбинация бифуркаций "седло—узел" и гомоклинического замыкания ("седло—узел" на предельном цикле); BT — точка бифуркации Богданова—Такенса.

[2] Значения, при которых в системе происходит бифуркация, далее будем называть *бифуркационными*.

[3] В стационарной точке векторное поле системы равно нулю. Такую точку также называют *положением равновесия*, *неподвижной точкой* или *стационарным решением*.

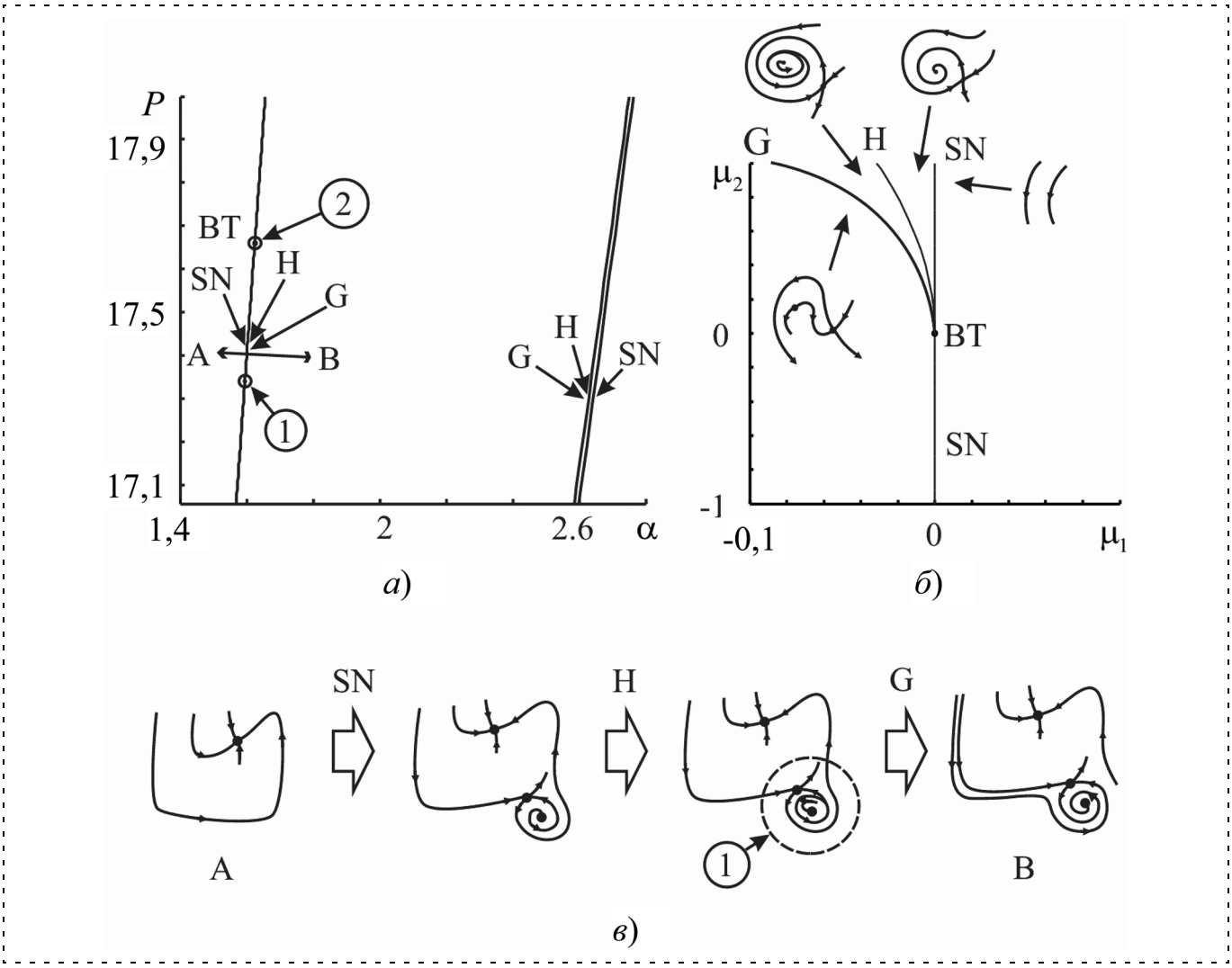


Рис. 3. Бифуркационные диаграммы для:
а — системы (2); *б* — для модели бифуркации Богданова—Такенса, *в* — последовательность бифуркаций и типы фазовых портретов при переходе из области *A* в область *B*

3. Формирование функциональной структуры регулятора, реализующего нелинейный закон управления, одинаково применимый для исходных моделей.

Процедура настройки обобщенной модели объекта. Исходная нелинейная модель задана в классе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}), \qquad (5)$$

где $\boldsymbol{x}$ — вектор состояния размерности n; $\boldsymbol{\theta}$ — вектор параметров размерности m; гладкая нелинейная функция $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta})$ задает векторное поле системы. Пусть в точке $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_b$, $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_b$ происходит бифуркация Богданова—Такенса.

Для моделей общего вида (5) известна процедура вычисления коэффициентов a и b модели (3). Она состоит из нескольких этапов и заключается в расчете преобразования из пространства модели бифуркации в пространство исходной модели (подробности процедуры можно найти в работах [3, 8, 9]). Ограничимся кратким содержанием этапов этой процедуры.

1. Приведение уравнений (5) к *стандартной форме* бифуркации. На данном этапе необходимо осуществить перенос точки бифуркации в начало координат и представить правые части уравнений модели в виде ряда Тейлора. После этого путем линейного невырожденного преобразования координат необходимо привести линейную часть системы к стандартной форме. Это преобразование может быть формализовано в виде замены координат[4]:

$$\boldsymbol{x}_{\text{т}} = \mathbf{L}\boldsymbol{x}_{\text{ст}} + \boldsymbol{x}_b, \qquad (6)$$

где $\boldsymbol{x}_{\text{т}}$, $\boldsymbol{x}_{\text{ст}}$ — векторы состояния размерности n системы в форме ряда Тейлора до и после перевода в стандартную форму; $\boldsymbol{x}_b$ — вектор-столбец смещений точки бифуркаций относительно нуля, размер-

[4] С геометрической точки зрения такая замена соответствует линейному смещению, повороту и масштабированию системы координат.

ность $1 \times n$; $\mathbf{L}$ — матрица линейной трансформации размерности $n \times n$. В результате преобразования (6) система дифференциальных уравнений переводится в стандартную форму бифуркации Богданова—Такенса (для $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_b$):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\text{ст}1} \\ \dot{x}_{\text{ст}2} \\ \dot{\boldsymbol{x}}_{\text{ст}3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{ст}1} \\ x_{\text{ст}2} \\ \boldsymbol{x}_{\text{ст}3} \end{bmatrix} + \boldsymbol{O}(2),$$

где $x_{\text{ст}1}, x_{\text{ст}2}$ — координаты пространства, касательного к *центральному многообразию*[5]; $\boldsymbol{x}_{\text{ст}3}$ — вектор координат линеаризуемой подсистемы размерности $n - 2$; $\mathbf{A}$ — матрица с ненулевым определителем размерности $(n - 2) \times (n - 2)$; $\boldsymbol{O}(2)$ — члены ряда Тейлора высшего порядка.

2. Редукция уравнений системы на центральное многообразие. В случае, когда недопустимо линейное проецирование уравнений динамики модели в пространство, касательное к центральному, требуется приближенный расчет нелинейного проецирующего преобразования, которое может быть представлено в виде ряда Тейлора:

$$\boldsymbol{x}_{\text{ст}3} = \sum_{2 \leqslant i+j \leqslant k} (\boldsymbol{a}_{ij} x^i_{\text{ст}1}\, x^j_{\text{ст}2}) + \boldsymbol{O}(k+1),$$

где k — число учитываемых членов; $\boldsymbol{a}_{ij}$ — вектор-столбец коэффициентов разложения; $\boldsymbol{O}(k + 1)$ — члены разложения порядка выше k. В ходе процедуры расчета подлежат определению коэффициенты $\boldsymbol{a}_{ij}$ разложения.

3. Приведение уравнений на центральном многообразии к форме бифуркации (3). Это достигается путем последовательных замен координат, устраняющих несущественные члены ряда Тейлора:

$$\begin{bmatrix} x_{1\text{ст},\,k} \\ x_{2\text{ст},\,k} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} x_{1\text{ст},\,k+1} \\ x_{2\text{ст},\,k+1} \end{bmatrix} + \sum_{i+j=k1} \boldsymbol{a}_{kij}\, x^i_{1\text{ст},\,k+1}\, x^j_{2\text{ст},\,k+1}, \quad (7)$$

где $x_{1\text{ст},\,k}$, $x_{2\text{ст},\,k}$ — координаты k-й итерации; $\boldsymbol{a}_{kij}$ — вектор коэффициентов k-й итерации преобразования. В ходе расчета определению подлежат неизвестные коэффициенты $\boldsymbol{a}_{kij}$, а также параметры a и b модели (3).

Отметим, что системы (1), (2) имеют ту же размерность, что и модель бифуркации (3), следовательно, расчет уравнений на центральном многообразии не требуется.

[5] Здесь и далее под центральным многообразием понимается не линеаризуемое в точке бифуркации подпространство исходной системы.

В общем случае преобразование, выполненное в соответствии с пунктами *1*, *3*, описывается уравнениями вида

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{y}),$$

где $\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{y})$ — класс гладких функций. При синтезе законов управления нас будет интересовать обратное преобразование:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{h}_i(\mathbf{L}^{-1}(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_b)), \quad (8)$$

где $\boldsymbol{y} = (y_1, y_2)^{\text{т}}$; $\boldsymbol{h}_i$ — композиция последовательности из i обратных преобразований (7), $\boldsymbol{h}_0(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{x}$. Кроме того, для учета зависимости преобразования от параметров введем в системы (3), (5) фиктивные уравнения[6]

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = 0; \ \begin{bmatrix} \dot{\mu}_1 \\ \dot{\mu}_2 \end{bmatrix} = 0,$$

и будем рассматривать замену координат (8) как отображение четырехмерного пространства $(x_1, x_2, \theta_1, \theta_2)^{\text{т}} \to (y_1, y_2, \mu_1, \mu_2)^{\text{т}}$.

Далее выберем функцию $\boldsymbol{h}_i$ линейной: $\boldsymbol{h}_0(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{x}$. Тогда получим выражение для замены координат (4):

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{y} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \mathbf{L}^{-1}\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} - \boldsymbol{c} \right), \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2)^{\text{т}}$, $\boldsymbol{c} = (\boldsymbol{x}_b, \boldsymbol{\theta}_b)^{\text{т}}$. Параметры $\mathbf{L}^{-1}$ и $\boldsymbol{c}$ вместе с коэффициентами a и b содержат *индивидуальные настройки* обобщенной модели для конкретного *объекта управления* и подлежат определению. Например, получены следующие значения параметров обобщенной модели для системы (1):

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \ \boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 1/2 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{bmatrix}; \ a = 0{,}5; \ b = -4, \quad (10)$$

а для модели Ивамото и Сено (2):

$$\mathbf{L}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1{,}7322 & -0{,}4854 & -1{,}8003 & 0{,}2621 \\ 0 & 0 & 1{,}8754 & -0{,}1732 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{c} = \begin{bmatrix} 1{,}0197 \\ 0{,}2249 \\ 1{,}6251 \\ 17{,}6622 \end{bmatrix}; \ a = -544{,}7465; \ b = -676{,}4046. \quad (11)$$

[6] Предполагается, что в исходной системе выделены два "существенных" параметра.

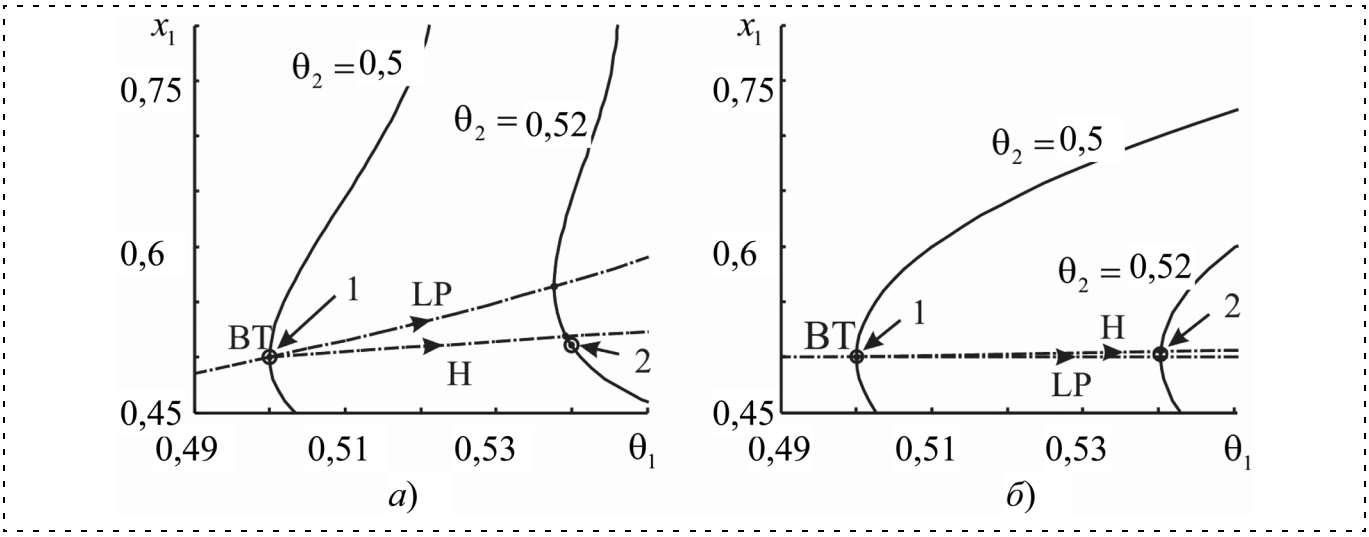


Рис. 4. Диаграммы решений:
а — исходной системы (1); *б* — обобщенной модели с настройками (10)

Подставляя координаты после замены в модель бифуркации, можем получить систему дифференциальных уравнений для обобщенной модели объекта. Для иллюстрации отличий в поведении исходной и обобщенной моделей на рис. 4 показаны диаграммы стационарных решений для системы (1).

Штрихпунктиром отмечены бифуркационные ветви[7], получаемые при варьировании двух параметров. Сплошной линией показана эволюция стационарных решений при вариациях параметра θ_1 и фиксированном значении θ_2. Цифрой *1* на обоих рисунках обозначена точка бифуркации Богданова—Такенса, для которой проводился расчет параметров обобщенной модели. Цифра *2* соответствует стационарному решению, в окрестности которого согласно поставленной задаче необходимо создать аттрактор.

Модель (4), (9) далее используется для выбора функции макропеременной. Такая функция рассматривается в статье как модель желаемого поведения управляемой системы.

О функциях макропеременных управляемой системы. Современная концепция "синергетической теории управления" [10] основана на переходе от управления в пространстве переменных состояния объекта к управлению в пространстве *макропеременных* управляемой системы. Функции макропеременных, определяющие желаемые соотношения между переменными и параметрами системы, используются как аргументы нелинейных оптимальных законов управления, переводящих динамическое состояние управляемой системы в область желаемого допустимого поведения и стабилизирующих состояние равновесия на целевом многообразии:

$$\psi(\boldsymbol{x}(t)) \to 0 \text{ при } t \to \infty, \qquad (12)$$

где $\psi(\boldsymbol{x}(t))$ — функция макропеременной системы; $\boldsymbol{x}(t)$ — вектор состояния.

Существует ряд подходов к построению функций макропеременных. В соответствии с одним из них для этого необходимо использовать априорные знания о "физике" процессов в управляемой системе, которые характеризуют допустимые законами природы применительно к конкретному объекту соотношения между значениями переменных и параметров. Этот подход подразумевает необходимый уровень специальных знаний свойств управляемого объекта [10].

Другие подходы основываются на формальных преобразованиях изначально допустимых макропеременных вдоль траекторий движения динамического объекта управления, заданного своими дифференциальными уравнениями и *a priori* вводимым целевым инвариантом (многообразием). Примером реализации такого подхода служит *T*-преобразование[8], позволяющее извлекать достаточную для конструирования функций макропеременных информацию из исходной модели объекта [2]. Процедура построения функций макропеременных на основе *T*-преобразования носит итеративный характер.

В обоих случаях известна проблема выбора изначально допустимых функций макропеременных. В статье они формируются с использованием модели обобщенного объекта (3), (9). Ожидается, что это позволит распространить решение поставленной задачи на группу объектов, описываемых в рамках модели бифуркации Богданова—Такенса и с определенной целью управления — стабилизацией тра-

[7] Множество точек бифуркаций.

[8] Введено и исследовано в кандидатской диссертации И. Ю. Тюкина (2001) "Алгоритмический синтез нейросетевых систем управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности".

екторий в окрестности одного из стационарных решений.

Рассмотрим динамическую систему (3) и определим желаемое поведение через дифференциальное уравнение линейного звена первого порядка:

$$T_1\dot{y}_ж + y_ж = 0, \qquad (13)$$

где T_1 — постоянная времени (параметр настройки регулятора). Такое поведение соответствует асимптотическому стремлению к нулю $y_ж(t)$:

$$\lim_{t\to\infty} y_ж(t) = 0. \qquad (14)$$

В случае, если $y_ж = y_1$, выполнено (14) и условие равномерной непрерывности[9] функции $\dot{y}_1(t)$, то, в соответствии с леммой Барбалата при $\dot{y}_1 = y_2$

$$\lim_{t\to\infty} y_2 = 0.$$

Это означает, что при $y_1 = y_ж$ обеспечивается асимптотическое стремление к нулю траекторий системы (3). Следовательно, в интересующей нас области фазового пространства ожидается появление аттрактора, что соответствует решению поставленной задачи управления.

Выберем в качестве функции макропеременных левую часть уравнения (13). Учитывая, что $y_ж = y_1$, $\dot{y}_1 = y_2$, получим выражение

$$\psi = T_1y_2 + y_1. \qquad (15)$$

Подстановка в (15) замены координат (9) приводит к макропеременной

$$\psi = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3, \qquad (16)$$

где коэффициенты k_1, k_2, k_3 — *параметры модели состояния*. Используя выражения для коэффициентов

$$k_1 = T_1l_{21} + l_{11};\ k_2 = T_1l_{22} + l_{12};$$

$$k_3 = T_1(l_{23}(\theta_1 - c_3) + l_{24}(\theta_2 - c_4) - c_1l_{21} - c_2l_{22}) + \\ + l_{13}(\theta_1 - c_3) + l_{14}(\theta_2 - c_4) - c_1l_{11} - c_2l_{12};$$

$$\mathbf{L}^{-1} = [l_{ij}];\ \boldsymbol{c} = [c_i],\ i, j = 1, 2, 3, 4,$$

могут быть вычислены их значения для рассматриваемых моделей на основе полученных ранее данных (10), (11) (см. таблицу).

В фазовом пространстве системы равенство нулю функции макропеременной (16) геометрически соответствует линии — *целевому многообразию*, которое можно назвать *искусственно введенным инвариантом для желаемой модели поведения управляемой системы*. Задачей нелинейного регулятора в таком случае является приведение фазовых траекторий системы из допустимой области к целевому многообразию с последующим удержанием изображающей точки на нем. Для синтеза оптимального нелинейного закона воспользуемся методом АКАР[10]. Для этого рассмотрим динамическую систему

Значения коэффициентов функции макропеременной

Система	Параметры бифуркации	k_1	k_2	k_3
(1)	(10)	1	−1	−0,02
(2)	(11)	−0,7322	−0,4854	0,8554

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}, u), \qquad (17)$$

где $\boldsymbol{x}$ — вектор состояния; $\boldsymbol{\theta}$ — вектор параметров; u — скалярное управление; функция $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}, u)$ задает векторное поле. Пусть при $(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta})^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{x}_b, \boldsymbol{\theta}_b)^{\mathrm{T}}$ в системе (17) происходит бифуркация Богданова—Такенса. В качестве функции макропеременной выберем выражение (16), а формальную цель регулятора определим в виде (12).

Согласно методу АКАР динамику управляемой системы определяет минимум сопровождающего функционала. Например, рассмотрим функционал

$$J = \int_0^\infty T\dot{\psi}^2(\boldsymbol{x}(t)) + \varphi^2(\psi(\boldsymbol{x}(t)))dt,$$

минимум которого достигается на экстремали

$$T\dot{\psi}(\boldsymbol{x}(t)) + \varphi(\psi(\boldsymbol{x}(t))) = 0 \text{ для } T > 0, \qquad (18)$$

где T — определяет скорость переходных процессов в замкнутой системе.

Подставляя в (18) выражения для ψ, раскрывая $\dot{\psi}$ по правилу дифференцирования сложной функции и учитывая, что $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\theta}, u)$, формируем уравнение относительно неизвестной функции u. Решая его, можем получить искомый закон управления. Ниже приведен результат решения для систем (1) и (2)[11]:

$$u_1 = \frac{k_1}{k_2}x_1^3 + x_2^3 + x_1^2x_2 + \frac{k_1}{k_2}x_2^2x_1 - \\ -\left(\frac{k_1}{k_2} + \sigma + \frac{k_1}{Tk_2}\right)x_1 + \left(\frac{k_1}{k_2}\sigma - \frac{1}{T} - 1\right)x_2 + \gamma - \frac{k_3}{Tk_2}; \qquad (19)$$

$$u_2 = 48{,}64EX^3 - 133{,}2EX^2 + \\ + 0{,}476\frac{k_1}{k_2}EX + \frac{k_1}{k_2}\left(\alpha - \frac{1}{T}\right)E + \\ + \left(\alpha - \frac{1}{T} + 50{,}2\right)X - 0{,}1\frac{k_1}{k_2}P - \frac{k_3}{Tk_2} - 5{,}35. \qquad (20)$$

[9] Равномерная непрерывность $\dot{y}_1$ следует из условия (14) с учетом уравнений (3) и $y_1 = y_ж$.

[10] Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (метод АКАР) составляет конструктивную часть синергетической теории управления [10].

[11] Здесь и далее предполагается, что сигнал u входит во второе уравнение системы (2).

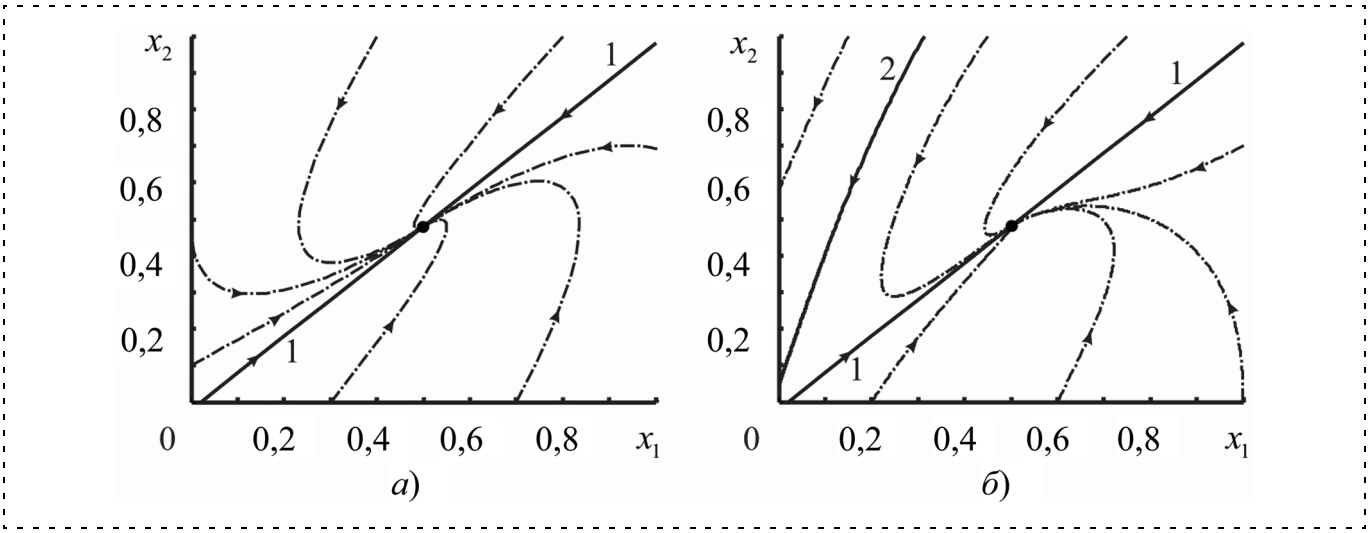


Рис. 5. Фазовый портрет замкнутой системы с аналитическим регулятором:
а — с обобщенной моделью системы (1); *б* — с исходной моделью системы (1)

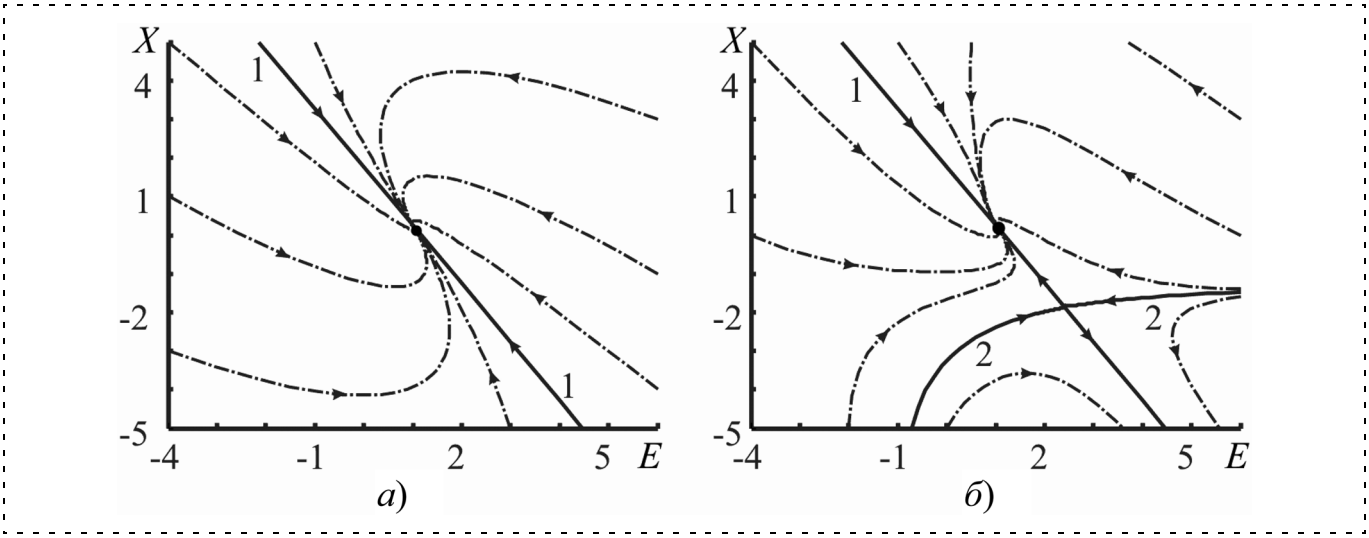


Рис. 6. Фазовый портрет замкнутой системы с аналитическим регулятором:
а — с обобщенной моделью системы (2); *б* — с исходной моделью системы (2)

Результаты моделирования замкнутой системы с законами управления (19) и (20) приведены на рис. 5, 6. Цифрой *1* обозначено целевое многообразие $\psi(\boldsymbol{x}) = 0$. Отметим, что аналитический прототип регулятора в обоих случаях создает аттрактор в окрестности интересующей области, но влияние неучтенной в обобщенной модели динамики поведения (немоделируемой динамики модели объекта) приводит к ограничению его бассейна притяжения. Граница бассейна обозначена цифрой *2* на рис. 5, *б* и 6, *б*. Отрицательные значения переменных, соответствующих концентрациям веществ, вообще говоря, не имеют смысла. Траектории с такими значениями приведены для иллюстрации границы бассейна притяжения аттрактора.

Реализация синтезируемого по методу АКАР регулятора осуществляется в виде программы, формирующей воздействия по *индивидуальному* для каждого объекта управления закону. При этом целевое многообразие остается одним и тем же в рамках группы объектов[12], динамику которых допустимо описывать в рамках обобщенной модели (3), (9). Отметим также, что по методу АКАР в его канонической форме для обеспечения заданных технологических требований качества работы системы необходимо сформировать модель возмущений внешней среды. Это означает, что даже для одного и того же объекта, но функционирующего в различных условиях, может потребоваться синтез различных законов регулирования.

[12] Далее будем говорить о такой группе как о *классе объектов*. В таком случае речь уже идет о *типовом регуляторе* для класса объектов со схожим поведением.

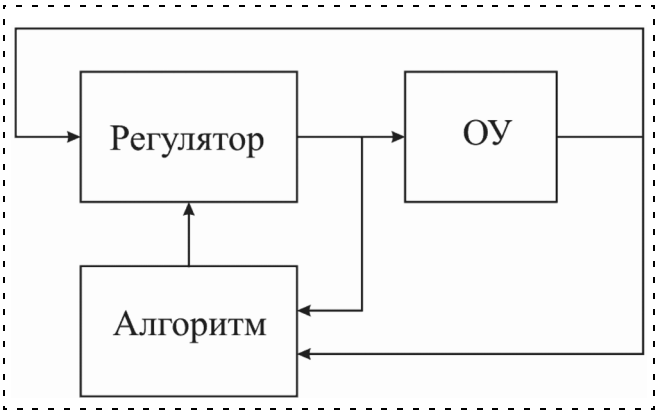


Рис. 7. Типовая функциональная структура нелинейной системы

Чтобы быть *типовым* для класса моделей объектов, разрабатываемый регулятор должен обеспечивать выполнение требуемых технологических показателей качества для замкнутой системы вне зависимости от *индивидуальных особенностей* объекта, куда входят как отличия типовой и исходной моделей, так и возмущения внешней среды. Другими словами, регулятор должен быть адаптивным и грубым по отношению к ним.

Формирование функциональной структуры системы управления. За основу типовой функциональной структуры нелинейной системы управления выберем базовую структуру (рис. 7). Она не выходит за рамки известной двухуровневой структуры адаптивных систем прямого действия.

Существенно различаются функции блоков такой системы. Блок "Алгоритм" строится на основе информации о классе математических моделей реального нелинейного объекта управления и это — перестраиваемая часть адаптивного нейрорегулятора. Блок "Регулятор" должен обладать способностью реализовать функцию из класса и это — структурно неизменяемая часть нейрорегулятора. Полезно провести параллель между типовыми ПИД-регуляторами и рассматриваемой структурой. В типовом ПИД-регуляторе неизменяемая часть — это аналоговая или цифровая схема с нормированными сигналами вход/выход, формирующая компоненты ПИД-закона, интерфейсные блоки, блоки настройки, контроля и т. п., а настраиваемая часть — параметры ПИД-закона под конкретный объект в классе типовых линейных моделей.

В нейрорегуляторе (на рис. 7 это блоки "Регулятор" и "Алгоритм") неизменяемая часть выполняется в виде настраиваемой многослойной нейронной сети (МНС), потенциально "содержащей" множество нелинейных функций управления, а перестраиваемая часть формируется на основе типовой макроинформации о состоянии конкретного объекта в классе и типового алгоритма настройки весовых коэффициентов синаптических связей искусственных нейронов (или библиотеки типовых алгоритмов).

Принципиальная возможность построения типового адаптивного нейрорегулятора обоснована использованием трех типовых решений:

1) типовой однородной функциональной структуры регулятора (блок "Регулятор") на базе обучаемой МНС;

2) типовых моделей состояния — целевых макропеременных фазового пространства управляемых объектов (целевых многообразий);

3) типовых алгоритмов обучения (настройки) нейросети в реальном времени.

В работе выбор типовых решений 1, 3 опирается на представленные в [2] результаты. Так, в качестве функциональной структуры блока "Регулятор" выбрана МНС прямого распространения с одним

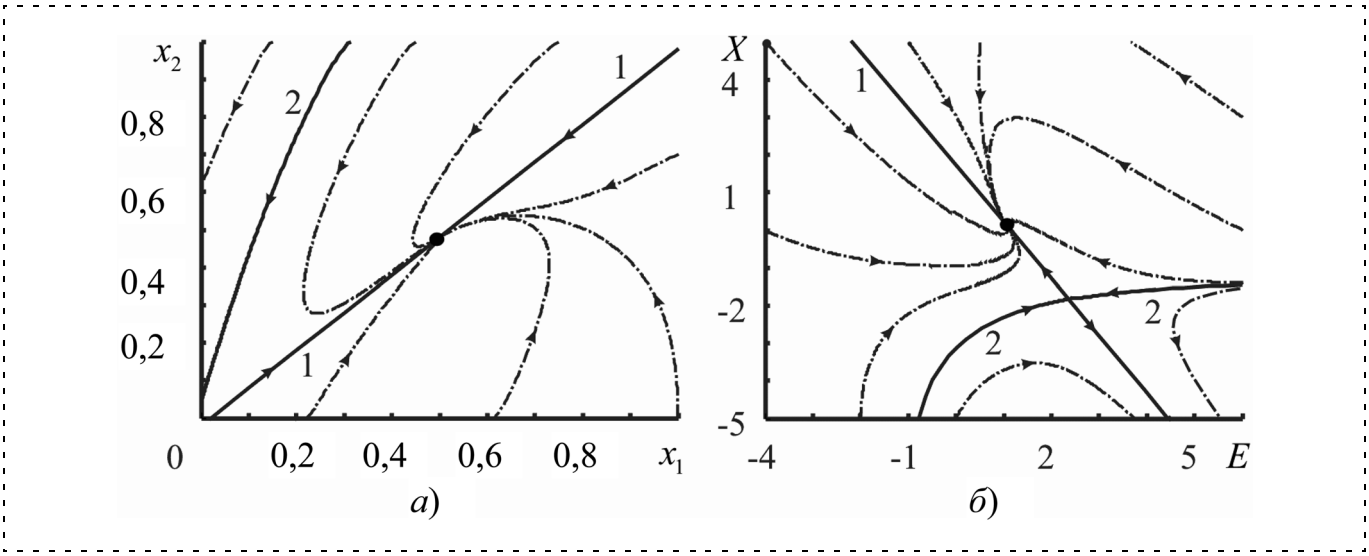


Рис. 8. Фазовые портреты замкнутой системы с нейрорегулятором:
а — с моделью (1); *б* — с моделью (2)

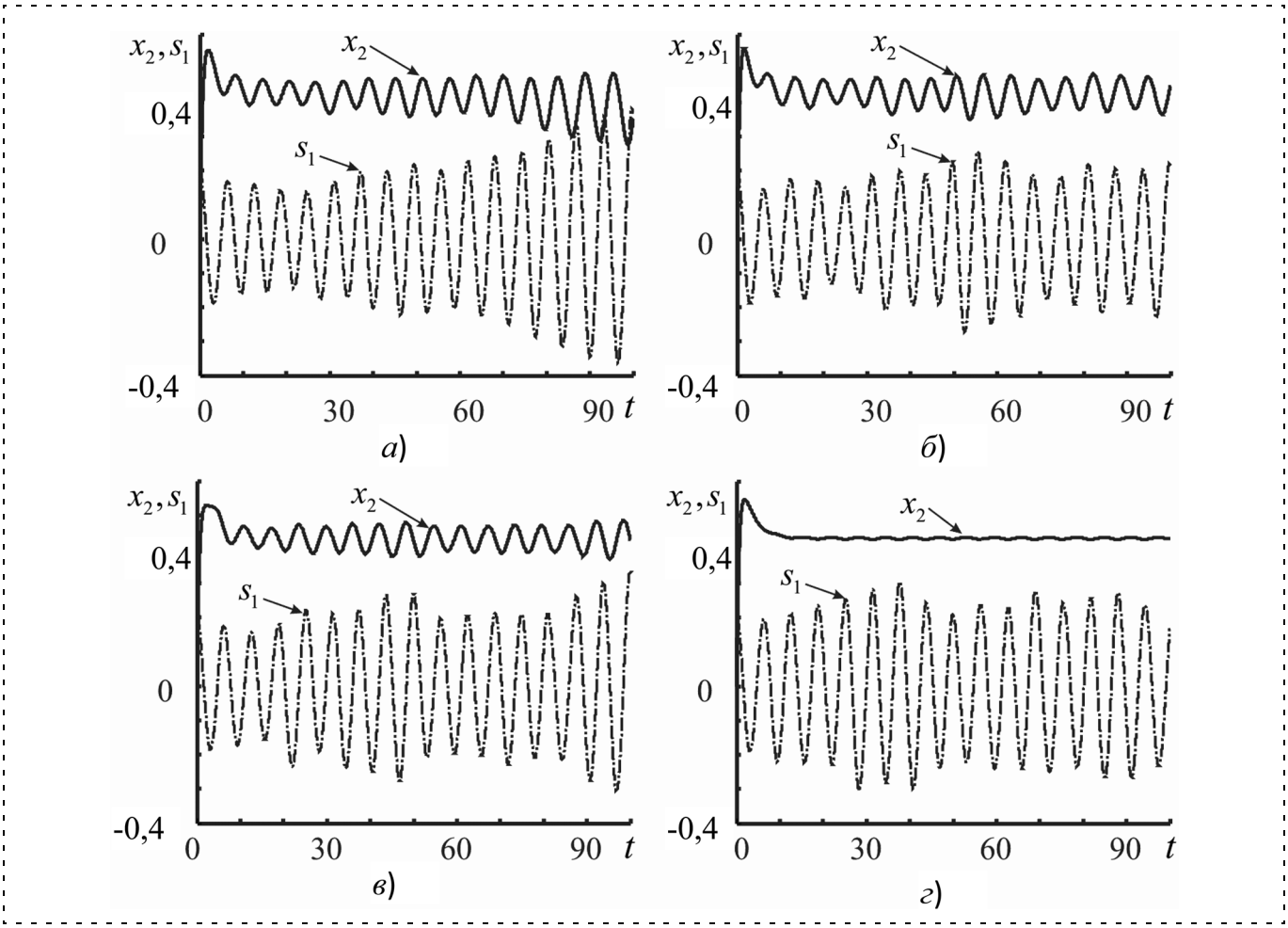


Рис. 9. Переходные процессы в системе (1):
с аналитическим (*а*, *в*) и нейрорегулятором (*б*, *г*): *а*, *б* — возмущение s_1 входит в первое уравнение (1); *в*, *г* — возмущение s_1 входит во второе уравнение (1)

скрытым слоем и сигмоидными функциями активации. Перестройка законов управления при изменении модели в процессе функционирования системы обеспечивается за счет динамического алгоритма настройки весовых коэффициентов МНС. При этом используется стандартный алгоритм обратного распространения ошибки, функция которой выбрана как выражение в левой части функционального уравнения (18). Аргументом функции ошибки обучения служат макропеременные системы, характеризующие состояние управляемого объекта во времени.

Для рассматриваемых в статье моделей объектов (1), (2) значения макропеременных вычисляются с помощью функции (16) на основе значений вектора состояния[13]. Проблема выбора начальных значений весовых коэффициентов в динамическом алгоритме обучения решается за счет предварительной аппроксимации блоком "Регулятор" аналитического прототипа закона, синтезируемого по методу АКАР. Окончательная подстройка блока "Регулятор" под конкретный объект управления происходит в реальном масштабе времени в процессе функционирования объекта.

Как показывают результаты моделирования, при отсутствии неопределенностей реализация регулятора на базе нейронной сети решает поставленную задачу, как и аналитический прототип (см. рис. 5, *б*, 6, *б* и 8, *а*, *б*). При этом нейронная сеть аппроксимирует аналитические законы управления (19) и (20).

При исследовании работы нейрорегулятора в условиях неизвестных сигнальных возмущений использована динамическая модель формирующего фильтра, возбуждаемого чисто случайным воздействием:

$$\dot{s}_1 = \omega s_2;$$

$$\dot{s}_2 = -\omega s_1 + D\beta(t),$$

где s_1, s_2 — значения амплитуд возмущения; ω, D — параметры; $\beta(t)$ — случайный сигнал с равномерным распределением значений. На рис. 9 приведены результаты компьютерного моделирования замкну-

[13] Предполагается, что вектор состояния доступен для измерений.

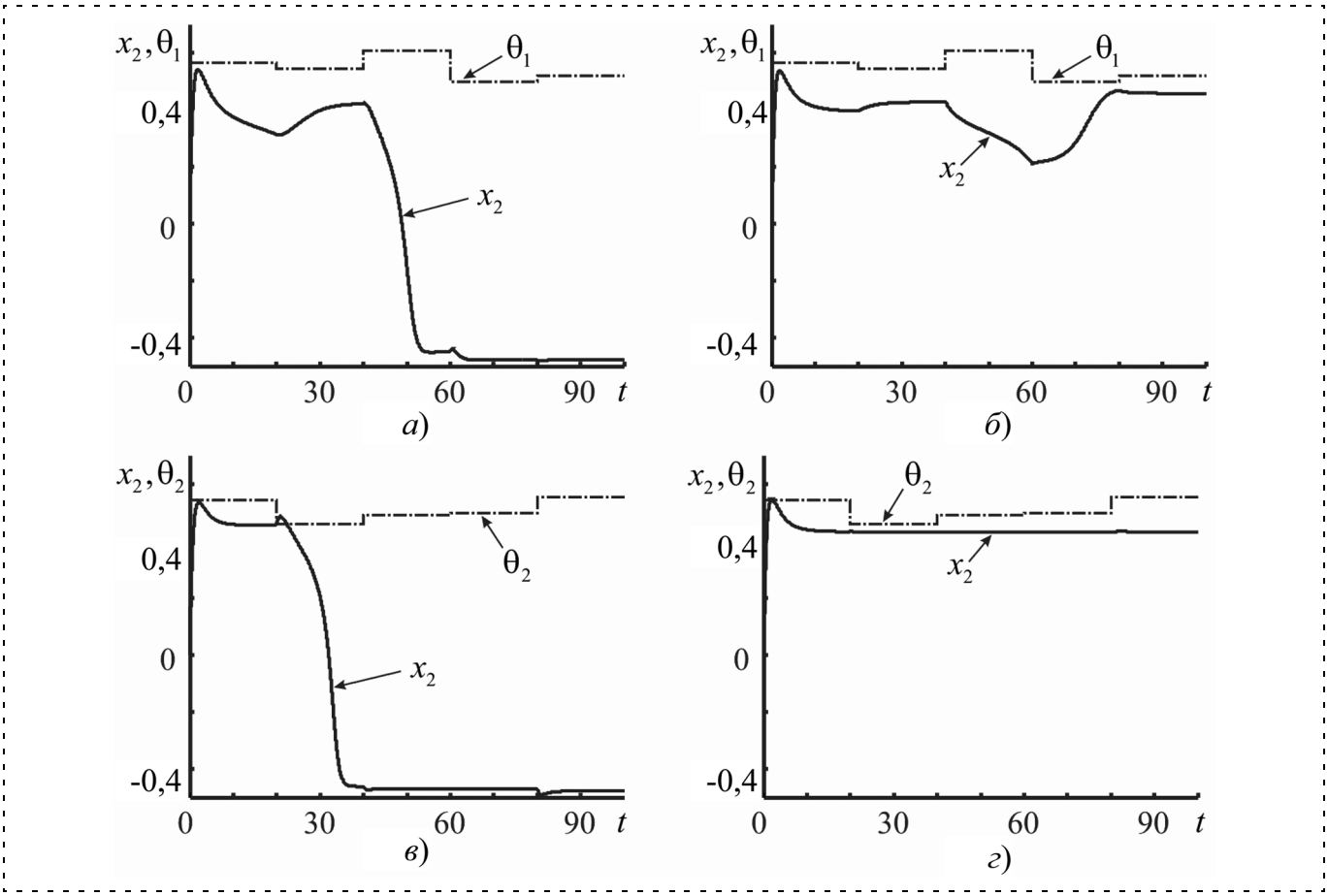


Рис. 10. Влияние вариаций значений параметров на переходные процессы в системе (1):
а — с аналитическим регулятором при вариациях θ_1; *б* — с нейрорегулятором при вариациях θ_1; *в* — с аналитическим регулятором при вариациях θ_2; *г* — с нейрорегулятором при вариациях θ_2

той системы с нейрорегулятором и аналитическим прототипом при добавлении сигнала $s_1(t)$ в первое и второе уравнения модели (1). Как видно из рисунков, в канале управления нейрорегулятор подавляет неизвестный сигнал. В остальном его поведение не отличается от поведения регулятора, формирующего аналитический прототип.

Влияние параметрических возмущений также проверяли в ходе численного моделирования. Параметры модели (1) с аналитическим прототипом и нейрорегулятором изменяли через равные промежутки времени на фиксированные значения. Результаты показывают, что при включении в контур регулирования аналитического регулятора может происходить потеря устойчивости стабилизируемого режима (рис. 10, *а*, *в*). В отличие от прототипа в системе с нейрорегулятором траектории не покидают окрестности интересующей области (рис. 10, *б*, *г*).

Заключение. В статье показана возможность построения нелинейного регулятора для группы нелинейных объектов, обладающих общими признаками в динамике поведения. Таким признаком могут быть, например, бифуркации Богданова—Такенса в некоторой окрестности исследуемого состояния. Как показали результаты численных экспериментов, использование уравнений такой бифуркации при формировании обобщенной модели поведения замкнутой системы позволяет решить поставленную задачу — сформировать аттрактор в интересующей области фазового пространства. При этом реализация законов управления, исходно допускающих сигнальные и параметрические неопределенности, показывает лучшие результаты по сравнению с жестко заданными аналитическими законами.

Отметим, что помимо рассматриваемой в статье точки Богданова—Такенса в теории бифуркаций описаны и другие особенности. Например, известны *локальные бифуркации*[14], различаемые по типу вырождения линейной части, размерности, числу существенных параметров и наличию симметрий. Существенно, что при использовании моделей таких

[14] "Локальность" возникает из-за "малых" отклонений от точки бифуркации. При этом некоторые "локальные" бифуркации выступают началом ветвей "глобальных" бифуркаций. Примером служит локальная бифуркация Богданова—Такенса.

бифуркаций последовательность шагов в процедуре синтеза нейрорегулятора *не изменяется*. Кроме того, эти модели допускают распространение на многомерный случай (вплоть до бесконечномерного). В таком случае задача синтезируемого нейрорегулятора может быть сформулирована как управление на центральном многообразии системы. Однако здесь может возникнуть проблема *достижимости*[15] целевых многообразий, формируемых по моделям бифуркаций.

Выбранное в статье желаемое поведение управляемой системы не является наилучшим. Во-первых, функция макропеременных для обобщенной модели выбиралась в наиболее простом, линейном виде. Во-вторых, использование преобразования координат в виде линейного выражения (9) является весьма приблизительным. Это становится заметным при отклонениях значений параметров от бифуркационных (см. рис. 4). Тем не менее, поставленная задача в целом решена, следовательно, показана возможность синтеза "типового" регулятора на основе модели локальной бифуркации.

Представленные результаты показывают, что существуют основания для дальнейших исследований в данном направлении, конечная цель которых — разработка промышленных типовых нейрорегуляторов.

[15] Выбор целевых функций макропеременных см. в [2, 10].

Список литературы

1. **Тюкин И. Ю., Терехов В. А.** Адаптация в нелинейных динамических системах / Предисл. Г. Г. Малинецкого. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 480 с. (Сер. "Синергетика: от прошлого к будущему".)
2. **Терехов В. И., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю.** Нейросетевые системы управления. Кн. 8. Под общ. ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 480 с. (Сер. "Нейрокомпьютеры и их применение".)
3. **Гукенхеймер Дж., Холмс Ф.** Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва—Ижевск: Институт компьютерных исследовании, 2002. 560 с.
4. **Iwamoto K., Seno M.** On Behaviors of a New Chemical Reaction Model Showing Hard Oscillation // Bulletin of the Chemical Society of Japan. Tokyo: Chemical Soc. of Japan. 1981. N 7(54). P. 669—673.
5. **Bykov V. I., Volokitin E. P., Treskov S. A.** Parametric analysis of the mathematical model of a nonisothermal well-stirred reactor // Combustion, Explosion, and Shock Waves. Novosibirsk: Springer N.-Y. 1997. N 3(33). P. 294—300.
6. **Березовская Ф. С., Карев Г. П.** Бифуркации бегущих волн в популяционных моделях с таксисом // УФН. № 9(169). 1999. С. 1011—1024.
7. **Takens F.** Singularities of vector fields // Publications Mathématiques de L'IHÉS. Springer Berlin: Heidelberg. 1974. Vol. 43. P. 47—100.
8. **Kuznetsov Yu. A.** Elements of Applied Bifurcation Theory // Series "Applied Mathematics Science". Vol. 12. N.-Y.: Springer-Verlag, 2004. 631 p.
9. **Холодниок М., Клич А., Кубичек М., Марек М.** Методы анализа нелинейных математических моделей: Пер. с чешск. М.: Мир, 1991. 368 с.
10. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

УДК 681.5+004.89

Ю. И. Нечаев, д-р техн. наук, проф.
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
nechaev@mail.ifmo.ru

Информационные технологии и управление в бортовых интеллектуальных системах новых поколений

Обсуждается применение современных информационных технологий в бортовых интеллектуальных системах управления динамическими объектами морского базирования. Акцент делается на особенностях моделирования поведения управляемых морских объектов в условиях морского волнения с использованием методов и технологий нелинейной динамики, синергетики и детерминированного хаоса. Рассматриваются также вопросы нейропрогноза возникновения экстремальных ситуаций.

Ключевые слова: *динамический объект морского базирования, бортовые интеллектуальные системы управления, моделирование поведения, морское волнение, нелинейная динамика, синергетика, детерминированный хаос, нейросетевой прогноз.*

Развитие науки и технологий в настоящее время сопровождается созданием технических средств интеллектуальной поддержки, отличающихся чрезвычайной сложностью, расширением круга решаемых задач и диапазоном эксплуатационного использования. В этих приложениях все чаще находят применение компьютерные технологии, основанные на использовании методов искусственного интеллекта (ИИ). Такие технологии ориентированы на цепочку "моделирование—прогнозирование—принятие решений" и связаны с разработкой сложных интегрированных интеллектуальных систем (ИС) (рис. 1). В основу решения задач интеллектуальной поддержки положен информационный подход, логический базис которого заключается в выявлении и анализе информационных аспектов, имеющих принципиальное значение для понимания глубинной сущности, тенденций и закономерностей исследуемой ситуации [1—37]. Анализ "информационного среза" изучаемых ситуаций позволяет сформулировать основные принципы, определяющие "скрытые" информационные процессы. В настоящее время активно развиваются качественно новые составляющие интеллектуальных тех-

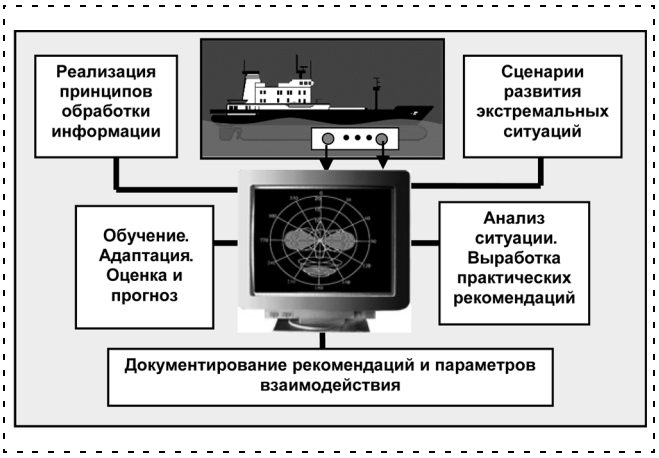


Рис. 1. Архитектура интегрированной бортовой ИС

нологий, включающие формальный аппарат математики, базирующийся на неалгоритмическом процессе управления, обладающем естественной параллельностью и недетерминизмом [7, 23, 24].

Появление ИС с динамической базой знаний потребовало пересмотра общих принципов организации и формализации знаний, а также программно-аппаратного обеспечения функционирования таких систем. Требования самообучения и самоорганизации в непрерывно изменяющейся нечеткой среде приводят к переосмыслению содержания и алгоритмического наполнения адаптивного компонента базы знаний и повышению роли математического моделирования при оценке и прогнозе поведения судна как сложного динамического объекта (ДО). Основной объем текущей информации здесь формируется не за счет формализации знаний экспертов, а на основе информации от датчиков измерительной системы. Возникли проблемы интеграции знаний и анализа альтернатив, особенно в сложных бортовых интеллектуальных комплексах, включающих ИС различного назначения и функционирующих в мультипроцессорной вычислительной среде с использованием нейронечетких систем управления и принятия решений [23, 24]. Встраивание в аппарат знаний процесса автоматического решения не только вычислительных, но и логико-комбинаторных задач позволяет продвинуться в решении одной из наиболее сложных проблем "инженерии знаний" — создании средств представления и обработки знаний [19—24].

При функционировании бортовых ИС обеспечения безопасности мореплавания и посадки летательных аппаратов (ЛА) морского базирования важное значение имеет надежная оценка ситуации и прогнозирование ее развития в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды. Особый практический интерес представляет построение нелинейных математических моделей, способных изменять свою структуру при изменении поведения ДО при морском волнении. При синтезе таких алгоритмов используют различные подходы — детерминистский, стохастический и подход на основе принципов самоорганизации [19—21]. Первые два подхода предполагают наличие в исходных данных полного информационного базиса, т. е. всех определяющих параметров и факторов, которые необходимо учитывать при анализе ситуации.

Моделирование динамики внешней среды при функционировании бортовых ИС

Моделирование динамики внешней среды — одна из сложных задач, решаемых при разработке встроенных процедур и алгоритмов взаимодействия судна с внешней средой при построении базы знаний бортовой ИС. Современный подход к решению этой задачи требует использования новых представлений о динамике ветроволновых полей на основе концепции климатического спектра морского волнения, официально принятой на 18 Ассамблее Межправительственной морской организации (Intergovernment Marine Organization — IMO) в 1993 г. вместе с понятием "волновой климат" [27]. С помощью этих понятий открываются возможности более детального, по сравнению с существующей практикой, описания особенностей волновой погоды в конкретных районах океана. Под климатическими понимаются спектры волнения, полученные в результате осреднения ординат измеренных спектров волнения для интервалов высот волн с заданным диапазоном.

Морское волнение относится к геофизическим процессам мелкомасштабного диапазона изменчивости с характерными временными и пространственными масштабами. Волнение рассматривается как вероятностный процесс, зависящий от набора факторов (условий волнообразования). Изменения связаны с прохождением барических образований (синоптическая изменчивость), годовой ритмикой (сезонная изменчивость) и долгопериодными вариациями циркуляционных процессов (межгодовая изменчивость). Получение информации об экстремальных гидрометеорологических явлениях в рамках понятия о климатическом спектре основано на совместном моделировании ветра, волнения и течений [33]. Концепция моделирования предусматривает последовательное решение задач, объединенных в вычислительную цепочку (рис. 2).

Гидродинамическая модель волнения в спектральной форме представляется как уравнение баланса волновой энергии:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \varphi}\dot{\varphi} + \frac{\partial N}{\partial \theta}\dot{\theta} + \frac{\partial N}{\partial k}\dot{k} + \frac{\partial N}{\partial \beta}\dot{\beta} + \frac{\partial N}{\partial \omega}\dot{\omega} = G, \quad (1)$$

где N — спектральная плотность волнового действия, которая является функцией от широты φ, долготы θ, волнового числа k и угла β между направлением волнового вектора и параллелью, а также от частоты ω и времени t. Это уравнение связывает между собой явления притока энергии от ветра, диссипации и ее перераспределения и нелинейного

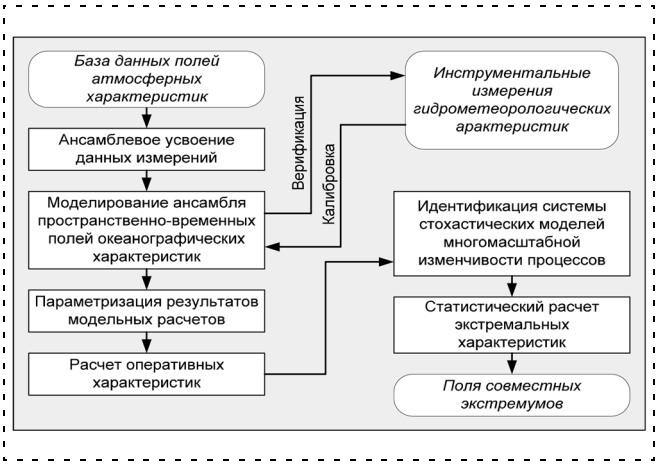


Рис. 2. Комплексная технология моделирования ветра, волнения, течений и уровня моря

взаимодействия между частотными составляющими процесса волнения. Чаще всего функция источника G записывается в виде суммы трех компонент: $G = G_{in} + G_{nl} + G_{ds}$ (поступления энергии от ветра к волнам, слабонелинейного взаимодействия в спектре ветрового волнения и диссипации волновой энергии, соответственно).

Для расчетов уровня моря и течений в общем случае используется трехмерная гидродинамическая бароклинная модель со свободной поверхностью. Исходная система уравнений в декартовой системе координат в приближении гидростатики и плоскости записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(vu) + \frac{\partial}{\partial z}(wu) - fv =$$

$$= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + N_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(N_z\frac{\partial u}{\partial z}\right); \qquad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) + \frac{\partial}{\partial z}(wv) + fu =$$

$$= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + N_h\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(N_z\frac{\partial v}{\partial z}\right); \qquad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g; \qquad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial T}{\partial z}\right); \qquad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uS) + \frac{\partial}{\partial y}(vS) + \frac{\partial}{\partial z}(wS) = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial S}{\partial z}\right); \qquad (7)$$

$$\rho = \rho(T, S, p). \qquad (8)$$

Здесь f — параметр Кориолиса; p — давление; ρ — плотность; T — температура; S — соленость; u, v, w — составляющие поля скорости течений по осям (x, y, z); N_z, N_h — коэффициенты вертикальной и горизонтальной вязкости; K_z — коэффициент вертикальной диффузии. Для приливных морей в правой части (3)—(4), (6)—(7) дополнительно учитывается приливная составляющая. Уравнения (1)—(8) интегрируются совместно.

Статистическая обработка информационной базы гидрометеорологических характеристик выполняется средствами многомерного статистического анализа (МСА) пространственно-временных полей, которые позволяют идентифицировать систему стохастических моделей гидрометеорологических полей. Методом Монте—Карло воспроизводится ансамбль реализаций заданного объема в смысле вероятностного описания. Полученный ансамбль позволяет оценить достоверность точечных оценок (в форме вероятностных, толерантных, доверительных интервалов), а также выполнить измерения вероятностных характеристик в случаях, которые не обеспечены выборочными данными (например, расчет экстремальных значений за интервал T, превышающий непрерывную продолжительность информационной базы).

Учет многомасштабной (мелкомасштабной, синоптической, сезонной, межгодовой) изменчивости требует использования стохастических моделей разных классов. Для воспроизведения океанографических полей в мелкомасштабном (секунды—часы) диапазоне изменчивости применена модель в форме динамической системы с учетом управляющих факторов $\eta(v)$:

$$\zeta_v = \sum_j \Phi_j \zeta_{v-j} + \sum_k \Theta_k \varepsilon_{v-k} + \sum_i \Xi_i \eta_{v-i}. \qquad (9)$$

Здесь Φ_j, Θ_k — матричные коэффициенты авторегрессии и скользящего среднего. Зависимость между η и ζ задается значениями весовой функции (функции отклика) Ξ_i.

Для воспроизведения синоптической изменчивости (перемежаемости штормов и окон погоды) использовано импульсное представление пространственно-временного поля в форме

$$\zeta(\vec{r}, t) = \sum_j a_j W_j(t, \vec{r}) = \sum_j a_j W_j^{(k)}(\vec{r}, \Xi_j),$$
$$\Xi_j = \Xi_j(t), \qquad (10)$$

где $W_j^{(k)}(\bullet)$ — пространственно-временные (временные) импульсы (выбросы выше и ниже уровня Z), движущиеся вдоль определенной траектории $\vec{r} = \vec{r}(t)$, возникающие и исчезающие случайным образом. Коэффициенты a_k суть интенсивности импульсов. Форма импульса, управляемая параметром k, определяется задачей исследования; для описания экстремальных явлений допустимо аппроксимировать $W_j(\bullet)$ по t треугольным импульсом.

Описание сезонной и межгодовой изменчивости требует применения другого класса моделей на основе ортогональных разложений по каноническому базису (естественным ортогональным функциям):

$$\zeta(\vec{r}, t) = m(\vec{r}, t) + \sum_k a_k(t)\phi_k(\vec{r}, t) + \varepsilon(\vec{r}, t). \quad (11)$$

Скалярные коэффициенты разложения $a_k = a_k(t)$ суть общие факторы, управляющие изменчивостью основных конфигураций поля, а ε — специфический фактор, характеризующий случайные вариации значений поля в каждой точке $\vec{r}$ в момент времени t. Модель (11) обобщается для описания регрессионной взаимосвязи исходного поля $\zeta(\vec{r}, t)$ с несколькими управляющими факторами — в форме линейной динамической системы (9) относительно коэффициентов их разложения по каноническим базисам. Применение комплекса стохастических моделей (9)—(11) лежит в основе метода оценивания экстремальных явлений BOLIVAR, позволяющего получить оценки сочетаний гидрометеорологических характеристик, возможных 1 раз в T лет.

В работе [27] приведены примеры типизации частотных и частотно-направленных спектров волнения на основе предложенной процедуры классификации, основанной на методах многомерного статистического анализа. На рис. 3 приведен пример классификации частотно-направленных спектров для Баренцева моря.

На рис. 3 выделено шесть классов морского волнения: *а* — зыбь; *б* — трехмерная модель ветрового волнения; *в* — смешанное волнение с разделением систем и преобладанием зыби; *г* — смешанное волнение с разделением систем и преобладанием ветрового волнения; *д* — смешанное волнение без разделения систем с преобладанием зыби; *е* — смешанное волнение без разделения систем с преобладанием ветрового волнения. Градуировка на графиках спектральной плотности $S(\omega)/S_{\max}$ по вертикальной оси; ω, c^{-1}, — по горизонтальной оси.

Следует отметить, что стандартные расчеты, выполняемые при оценке динамики сложных объектов на реальном морском волнении с учетом понятия о климатическом спектре могут приводить к существенному отличию результатов и нередким ошибкам в опасную сторону по сравнению с данными, полученными при использовании различных модификаций однопикового спектра, принятого в практике проектирования морских сооружений. Поэтому при разработке бортовых ИС, предназначенных для контроля поведения ДО под воздействием реальных динамических нагрузок в экстремальных ситуациях, игнорирование представления о климатическом спектре недопустимо, поскольку ошибки в опасную сторону могут привести к катастрофическим последствиям. Анализ климатических спектров морского волнения с использованием нейросетевых технологий открывает большие возможности для реализации алгоритмов обработки информации о динамике внешней среды при функционировании бортовых ИС в режиме реального времени [26].

Исходные данные о текущей ситуации при функционировании ИС получают путем обработки информации от датчиков измерительного комплекса. Обработка этой информации реализуется в режиме реального времени и позволяет "настроить"

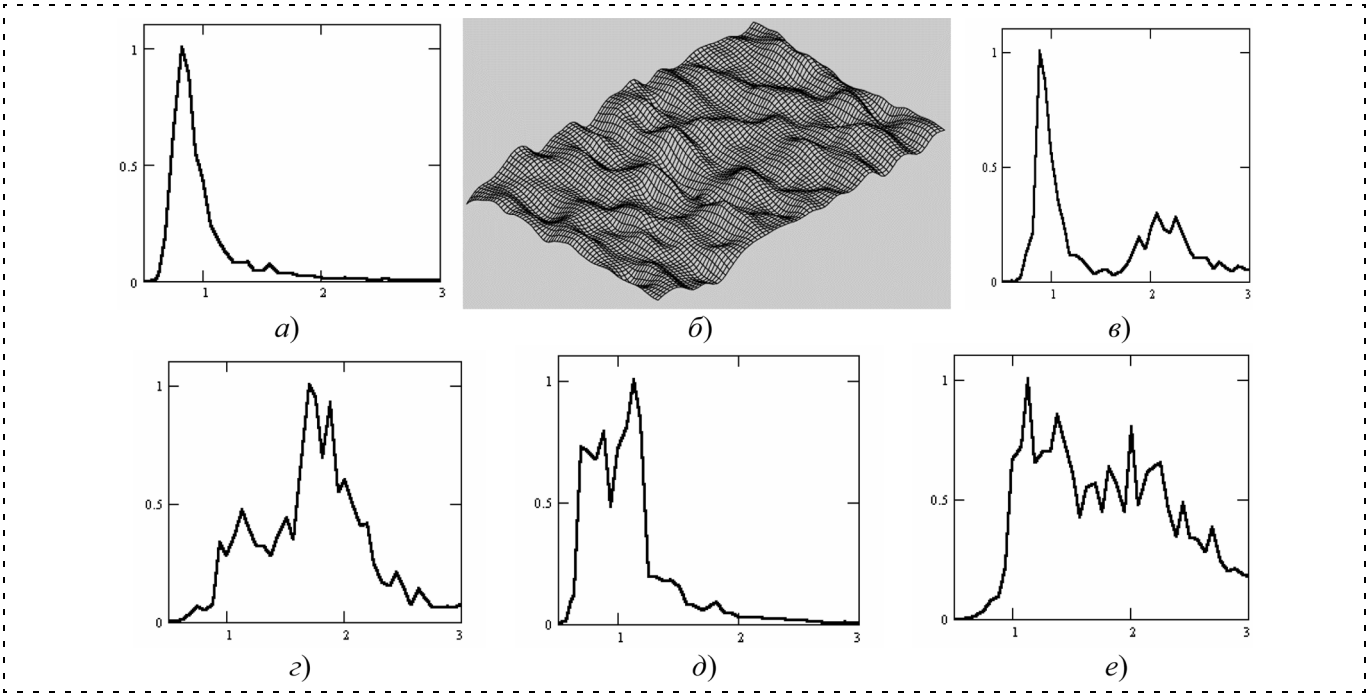


Рис. 3. Типовые нормированные спектры морского волнения

ИС на решение задач интерпретации текущей ситуации. Алгоритмы анализа и прогноза ситуации базируются на изобретениях автора, позволяющих восстанавливать текущие характеристики волнения и параметры сложного ДО, а также строить фактические значения функций принадлежности, определяющие логику функционирования динамической базы знаний (оценку опасности ситуации и прогноз ее развития) на основе фактических данных о состоянии внешней среды и ДО. В этих приложениях находит широкое применение принцип конкуренции, определяющий парадигму обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде с использованием методов классической математики и нейросетевых технологий.

Особенности моделирования динамики объекта как нелинейной диссипативной системы

Динамика нелинейных систем — одна из быстро развивающихся областей практических приложений методов и моделей в задачах управления и принятия решений. Математические модели, характеризующие нелинейную динамику, обладают специфическими свойствами — единой структурой и общим признаком нелинейности. Слабая нелинейность — уже давно завоеванный наукой рубеж. Здесь существуют общие методы решения и разработаны эффективные алгоритмы для практических приложений. Методы решения задач с более сильными проявлениями нелинейности основаны на сложных математических построениях и использовании современных вычислительных средств [7]. Анализ нелинейностей позволяет вскрыть особенности задачи, где заложены возможности нетривиальных решений, и построить общую теорию, описывающую поведение нелинейных систем. Наличие колебательных режимов большой амплитуды включает в действие новую физическую связь, "дремавшую" в случае слабых возмущений. Не случайно эта проблема является определяющей при контроле ДО и посадке ЛА морского базирования [7, 34].

Нелинейные модели ДО на волнении характеризуются рядом особенностей, учет которых связан с поиском эффективных алгоритмов реализации модели взаимодействия [7, 10], а именно:

1) наличием неопределенности в описании внешних сил (ветро-волновые возмущения), определяющей трудности формирования начальных условий задачи;

2) необходимостью учета сложной пространственной нелинейной функции, описывающей восстанавливающий момент на волнении. Корректность ее определения связана с учетом интерференционной компоненты, теоретических методов расчета которой (вследствие чрезвычайной сложности нелинейной задачи гидродинамики) до настоящего времени не предложено;

3) трудностью математического описания некоторых задач потери остойчивости, формализация которых может быть достигнута только на основе гипотез и обобщающих предположений.

Указанные особенности определили новую парадигму, определяющую различные подходы к решению задач динамики системы, определяющей поведение ДО на волнении:

- детерминистический подход, при реализации которого динамика системы полностью определяется формулировкой начальных условий исследуемой математической модели;
- стохастический подход, при котором начальные условия задачи не определены, трудно формализуемы и не могут быть корректно сформулированы вследствие стохастичности исследуемого процесса взаимодействия.

При решении задач первого направления формулировка модели взаимодействия основывается на достаточно простых расчетных схемах ветроволновых возмущений. В частности, воздействие ветра представляется в виде отработанных расчетных схем, которые нашли применение в практике нормирования, а волнение аппроксимируется гармоническими функциями, либо в виде трохоиды [8, 22]. При исследовании стохастических систем наиболее эффективный путь состоит в формулировке начальных условий "на другом конце" задачи и интегрировании системы дифференциальных уравнений в обратном времени с использованием метода функционала действия [9].

Рассмотрим ДО как динамическую систему с шестью степенями свободы. Поведение судна можно описать системой нелинейных дифференциальных уравнений [7, 10]:

$$F_i[\ddot{x}_i,\ \dot{x}_i,\ x_i,\ t,\ X_{i1},\ ...,\ X_{im},\ Y_{i1},\ ...,\ Y_{in}] = 0, \quad (12)$$

где $F_i(\bullet)$ — нелинейные функции; x_i — линейные и угловые перемещения; $X_{i1}, ..., X_{im}$ — параметры ДО; $Y_{i1}, ..., Y_{in}$ — возмущающие силы и моменты; $i = 1, 2, ..., 6$.

Реализация системы (12) на современных быстродействующих компьютерах не представляет принципиальных затруднений. Однако в практических задачах принято рассматривать вполне определенные положения ДО на волнении (носом на волну, лагом к волне, на попутном волнении). Учитывая симметрию корпуса относительно диаметральной плоскости, а также незначительную асимметрию относительно миделя, можно упростить исходную систему (12), иногда использовать и отдельные уравнения, пригодные в каждом конкретном случае ориентации ДО относительно генерального направления бега волны.

Наиболее сложной функцией в системе (12) является так называемый восстанавливающий момент, входящий в дифференциальное уравнение бортовой качки, отличающийся существенной нелинейностью и многозначностью. Непрерывно изменяясь во времени и пространстве, эта функция в значительной степени определяет результат интегриро-

вания системы (12) при изучении физических картин взаимодействия ДО с внешней средой.

Типичными математическими моделями поведения ДО при разработке динамической модели знаний в бортовых ИС реального времени являются [7, 10, 25]:

а) математическая модель, описывающая поведение ДО в экстремальных ситуациях с помощью дифференциальных уравнений бортовой, вертикальной и килевой качки;

б) математическая модель, описывающая поведение ДО в условиях потери управляемости и внезапного разворота на попутном волнении (режим "брочинг") с помощью системы дифференциальных уравнений продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной, бортовой качки и рыскания ДО на волнении [18, 32];

в) математическая модель, описывающая поведение аварийного судна на волнении с помощью дифференциальных уравнений поперечно-горизонтальной и бортовой качки судна с затопленными отсеками на волнении [25].

Нейроаппроксимация и нейропрогноз при контроле экстремальных ситуаций в сложных динамических средах

Исследования и разработки в области ИИ позволяют рассматривать бортовую ИС как сложную, целостную открытую систему, представляющую собой совокупность динамических структур, согласованно выполняющих функции, обеспечивающие целенаправленное поведение системы в различных условиях эксплуатации. Одной из центральных задач анализа и обобщения результатов исследований является построение интегрированных ИС, использующих методы и модели нечеткого и нейросетевого логического базисов. Это позволяет более гибко и адекватно описывать феномен поведения судна как сложного ДО в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

Основным этапом нейросетевого моделирования являются постановка и решение задачи аппроксимации на основе нейросетевого логического базиса [9, 26], в рамках которого осуществляются:

- описание исходных данных и желаемого выходного сигнала, определение вектора сигнала ошибки, формирование функционала оптимизации через сигналы в системе и выбор метода поиска экстремума этого функционала;
- аналитическое определение преобразования информации в нейронной сети и выбор конкретной ее структуры, нахождение аналитического выражения для градиента функционала оптимизации поставленной задачи и выбор начальных условий при настройке сети;
- выбор типовых входных сигналов для тестирования процесса решения задачи и разработка плана эксперимента.

Обобщенная схема, характеризующая этапы разработки ИНС в задачах нейроаппроксимации, представлена на рис. 4.

При проектировании ИНС возникает задача выбора оптимальной структуры сети. Под оптимальной структурой понимается такая топология сети (числа скрытых слоев и нейронов в слоях), при которой обеспечивается максимум ее обобщающих способностей, т. е. минимум ошибки обобщения (generalization error). Это особенно важно в случае недостаточной исходной информации, особенно при отсутствии независимой тестовой выборки экспериментальных данных.

При решении задачи структурного и параметрического синтеза широко используется парадигма "кривых обучения" (learning curves), представляющих собой зависимости ошибок обучения и обобщения от размеров ИНС и обучающей выборки. Оптимуму размера сети соответствуют локальные минимумы или моменты выхода графиков на асимптоты.

Структура нейросетевого ансамбля для построения классификатора эталонных моделей климатических спектров морского волнения представлена на рис. 5. Ансамбль состоит из группы RBF-сетей, воспринимающих информацию от измерительной системы. Каждая сеть имеет m входов, на которые подается вектор измерений $x_1, ..., x_m$, и два пара-

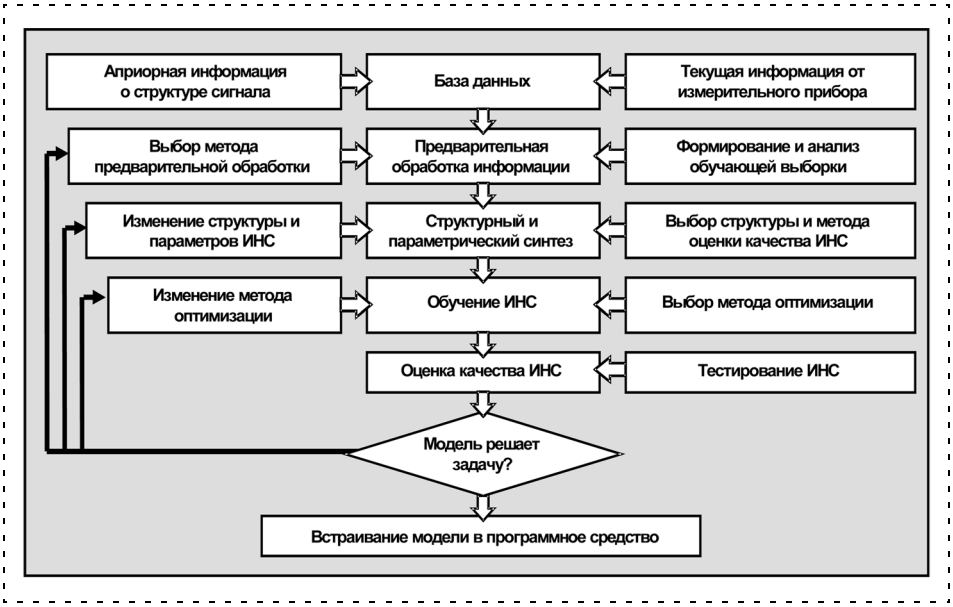


Рис. 4. Поток информации при формировании и обучении нейронной сети

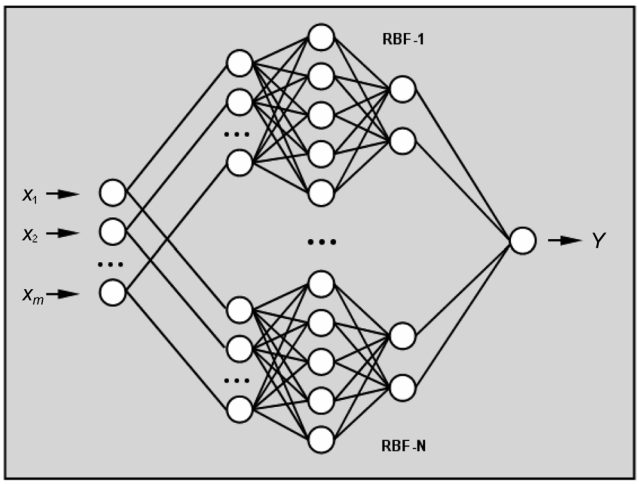


Рис. 5. Нейросетевой ансамбль, реализующий модели климатических спектров морского волнения

метра на выходе (1 — нормальное состояние, 0 — отказ). Если на выходе сети обнаружен отказ, то это свидетельствует о том, что поданный на нейросетевой ансамбль сигнал не соответствует ни одному из принятых эталонов. В этом случае необходимо перейти к более сложной структуре нейросетевого ансамбля, представляющего собой интегрированный нейросетевой комплекс.

Структура интегрированного нейросетевого комплекса отрабатывалась в процессе моделирования задач идентификации экстремальных ситуаций. На рис. 6 представлена модель такой сети, базирующаяся на нейронном ансамбле: "радиально-базисная сеть — персептрон — сеть Кохонена" [26]. Разработанная архитектура особенно перспективна в задачах обработки сложных сигналов большой размерности и обеспечивает разложение исследуемых параметров на отдельные составляющие с общей параметрической "привязкой". Эффективное решение общей задачи преобразования информации достигается за счет разделения функций нейросетевого ансамбля. Первый входной слой представлен набором RBF-сетей, обеспечивающих фильтрацию данных, второй промежуточный слой — это персептрон, выполняющий функцию концентратора, и наконец, выходной слой — самоорганизующаяся сеть Кохонена, реализующая задачу классификации данных [8, 21].

В процессе анализа взаимодействия ДО с внешней средой возникают ситуации, требующие предварительного анализа сигнала, порождаемого системой и представленного заданной временной последовательностью. Эта последовательность несет в себе достаточно представительную информацию о рассматриваемой динамической системе. В соответствии с теоремой *Такенса* [36] можно по эволюции переменной составить общее представление о динамике системы путем реконструкции *аттрактора*. Восстановление аттрактора динамической системы на основе зависимости $x = x(t)$ осуществляется за счет использования метода временной задержки координат.

Для построения отображений на аттракторе исследуемой системы наряду с методами классической математики используются нейросетевые технологии. Проверка эффективности реконструированных моделей осуществляется с помощью временных рядов, генерируемых датчиками измерительной информации по данным натурных испытаний. Проблемы, возникающие при практическом применении реконструкции аттрактора, связаны с ограниченностью временного ряда, хранением и скоростью обработки информации, а также со стационарностью исследуемого объекта. На основе данных измерений проводится анализ ситуации и строятся алгоритмы обработки измерительной информации, наилучшим образом отображающие тенденции в изменении компонент информационного вектора. При этом выделяются нестандартные (нештатные и экстремальные) ситуации, осуществляется оценка и прогноз их развития на основе конкурирующих вычислительных технологий [19] в рамках концепции мягких вычислений [37].

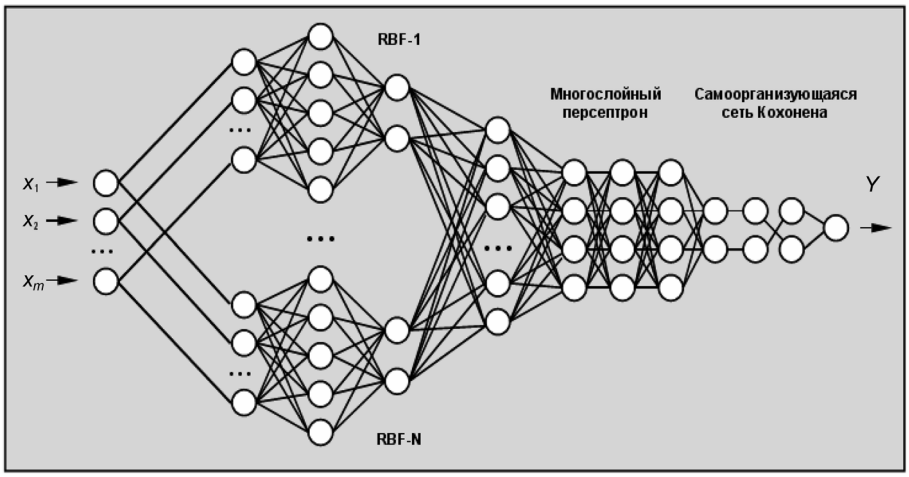


Рис. 6. Структура интегрированного нейросетевого комплекса, реализующего оператор преобразования сложных сигналов при контроле экстремальных ситуаций

Алгоритм восстановления аттрактора и нелинейного прогноза может быть представлен в виде следующих этапов [16]:

Этап 1. Реконструкция топологической модели динамической системы, продуцирующей временной ряд. Такая

модель представляет собой вложение ряда в R_m, натянутое на m-мерные векторы, составленные из отсчетов временного ряда, взятых с постоянным дискретным шагом (лагом). Условие $m \geqslant 2d + 1$ гарантирует, что полученная реконструкция будет копией истинного d-мерного аттрактора системы. Реконструкция приводит к однородной схеме нелинейного авторегрессионного прогноза

$$x_{i+1} = F(x_i, x_{i+\tau}, ..., x_{i+(m-1)\tau}).$$

Этап 2. Аппроксимация функции F, реализуемой с помощью нейронной сети. Решающую роль в таком подходе играет правильный выбор параметров вложения ряда — размерности и лага.

Стандартная процедура Ф. Такенса [36] (равномерное вложение) достаточно хорошо восстанавливает топологию аттрактора систем, имеющих один характерный масштаб времени. Однако исследуемая система характеризуется "быстрой" и "медленной" динамикой. В таком случае рассматривают два масштаба времени, поскольку лаг, выбранный по первому нулю автокорреляционной функции быстрой моды, не сможет контролировать независимость отсчетов в задачах многоциклической динамики. В работе [16] предложен вариант неоднородного вложения, адаптированный к таким задачам.

При контроле динамики объекта рассматривают одношаговый и многошаговый нейропрогноз. *Одношаговый прогноз* осуществляется только на один шаг вперед и используется для краткосрочных прогнозов. Результатом прогноза является не только конкретное значение, но и класс, к которому принадлежит переменная (рис. 7). *Многошаговый прогноз* используется для реализации долгосрочного прогноза возникновения экстремальных ситуаций. Процесс построения прогнозирующей модели

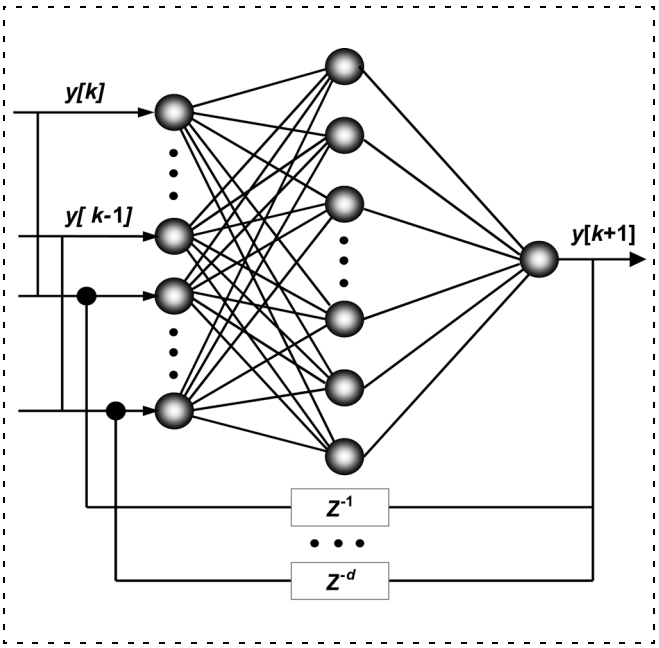


Рис. 7. Нейронная сеть, реализующая одношаговый прогноз

предусматривает предварительное определение числа используемых элементов временного ряда и ошибок прогнозирования. Эти операции завершаются схемой построения ИНС, включающей решение задач структурного и параметрического синтеза.

После выполнения процедур реконструкции временного ряда начинает работать программа нейросетевого моделирования. Программа позволяет проводить обучение нейронной сети с любым числом нейронов, в том числе нейронов выходного слоя. При инициализации ИНС в качестве параметров указывается число входных и выходных нейронов и число нейронов скрытого слоя. При моделировании из общего набора исходных данных формируется обучающая выборка, размер которой зависит от числа нейронов входного и выходного слоев. Обучающая выборка передается в функцию обучения нейронной сети TrainNetwork, в параметры которой также входят длина обучающей выборки и максимальная погрешность обучения.

При контроле поведения сложных ситуаций в бортовых ИС используются нейронечеткие сети. Пример структуры такой сети, реализующей контроль динамики полетной палубы при посадке летательного аппарата, приведен в работе [24].

Нелинейные эффекты и сценарии развития хаоса в диссипативных динамических средах

При разработке моделей нейроаппроксимации и нейропрогноза в бортовых ИС важное значение приобретает исследование физических закономерностей процессов и явлений, отображающих результат взаимодействия ДО с внешней средой в различных условиях эксплуатации. Ниже продемонстрированы основные особенности поведения нелинейных диссипативных систем, которые установлены в процессе анализа и интерпретации информации, получаемой в результате функционирования встроенной процедуры моделирования экстремальных ситуаций на основе данных динамических измерений.

В процессе развития динамики нелинейной системы формируются простые (обычные) и странные (стохастические) аттракторы. С простыми аттракторами мы часто встречаемся при анализе нелинейных диссипативных систем. Геометрической интерпретацией простого аттрактора диссипативной системы на фазовой плоскости является либо неподвижная точка (фокус), к которой устремляются фазовые траектории, либо предельный цикл, обладающий таким свойством, что все близкие фазовые траектории представляют собой спирали, неограниченно приближающиеся к замкнутой кривой в фазовом пространстве (рис. 8).

Типичный сценарий возникновения и развития режима интенсивной качки большой амплитуды можно наблюдать при исследовании параметрических колебаний. Закономерности этого режима качки связаны с особенностями пакета волн зыби, при воздействии которого формируется предельный

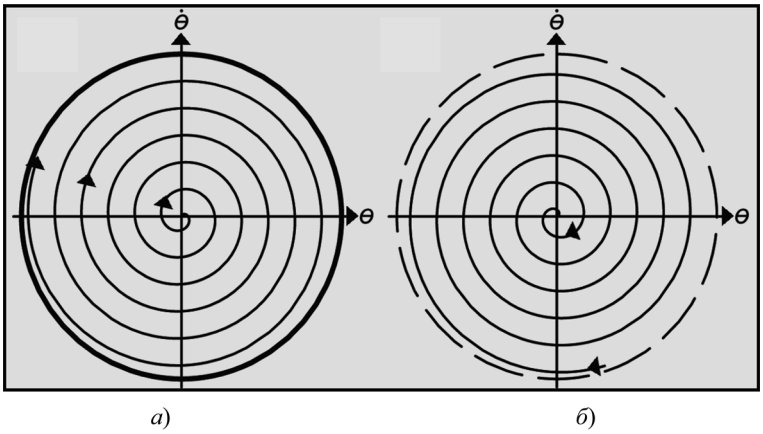


Рис. 8. Формирование предельного цикла при воздействии группы волн

цикл, характеризующийся стабилизацией амплитуды колебаний вследствие влияния нелинейности (рис. 8, *а*).

Этот цикл возникает на участке, где последовательность резонансных волн в пакете превышает определенное значение $(hw)_{CR}$, обеспечивающее колебательный режим с практически постоянной амплитудой θ_{max}. Однако в связи с последующим постепенным уменьшением высот волн в пакете нарушаются условия устойчивости и цикл исчезает (рис. 8, *б*).

Более сложный сценарий — столкновение с неустойчивым циклом (рис. 9). Такая ситуация на практике встречается значительно реже и характеризуется последовательным прохождением пакетов волн, содержащих волны различной интенсивности. Например, первый пакет с небольшой высотой резонансных волн приводит к формированию предельного цикла малой, а второй — большой амплитуды. Возникновение и потеря устойчивости колебательного режима ("рождение и смерть цикла" по терминологии А. А. Андронова [4]) происходят вследствие ограниченности зоны резонансной качки на сравнительно небольшом временном интервале интенсивных колебаний при прохождении волновых пакетов.

Интересно отметить, что развитие параметрических колебаний при формировании предельного цикла в большей степени проявляется для волновых систем, содержащих группы почти регулярных волн. В этом случае за счет большей глубины модуляции параметра, стоящего в качестве множителя при периодической функции уравнения Матье [18], формируются начальные условия, обеспечивающие преодоление "порога возбуждения" параметрического резонанса. В результате возникновение и развитие параметрических колебаний отмечается даже на волнах относительно меньшей крутизны.

Странные аттракторы отличает более сложная структура. Кроме неустойчивых (разбегающихся) траекторий они содержат и устойчивые (притягивающие) траектории. По существу, это седловые траектории, устойчивые по одним направлениям и неустойчивые по другим, и образующие множество не касающихся друг друга сложным образом соединяющихся слоев.

Развитие учения о хаотической динамике нелинейных систем выявило целый ряд реальных практических задач, в том числе и в гидродинамике судна [29, 30], где хаотические режимы действительно могут возникать при сложном взаимодействии судна с внешней средой. Возникли практически важные классы задач, когда нелинейной системой необходимо управлять, изменяя степень ее хаотичности. Методы решения подобных задач в последние годы стали активно развиваться, особенно в приложениях, посвященных различным аспектам применения методов управления к хаотическим процессам.

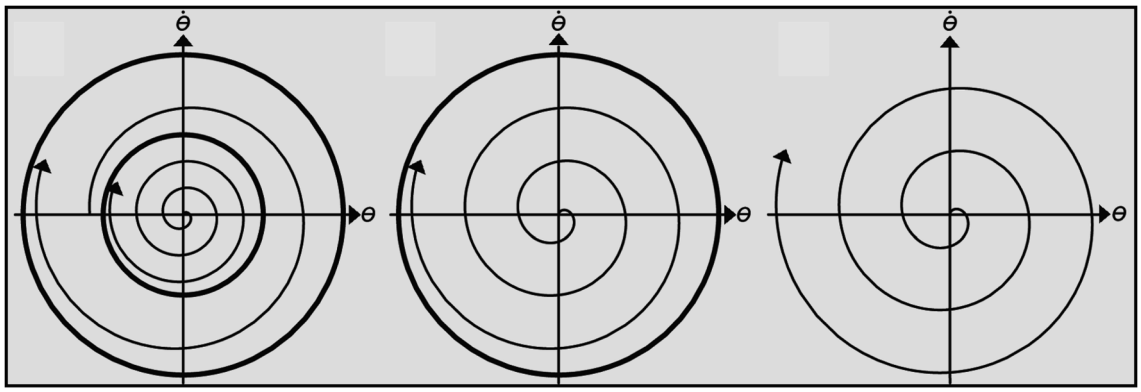


Рис. 9. Возникновение (*а*) и потеря устойчивости цикла (*б*), (*в*)

Управление в самоорганизующихся системах

Задачи и методы управления хаосом — область интенсивных исследований последних десятилетий. Концепция детерминированного хаоса сначала считалась экзотическим явлением, представляющим интерес для математиков. Однако впоследствии хаотическая динамика была обнаружена в огромном числе различных систем: в механике, системах связи, лазерной физике и радиофизике, химии и биологии, экономике, медицине. Системы с хаосом демонстрируют одновременно и хорошую управляемость, и удивительную пластичность: система чутко реагирует на внешние воздействия, сохраняя при этом тип движения [2, 15, 22, 31].

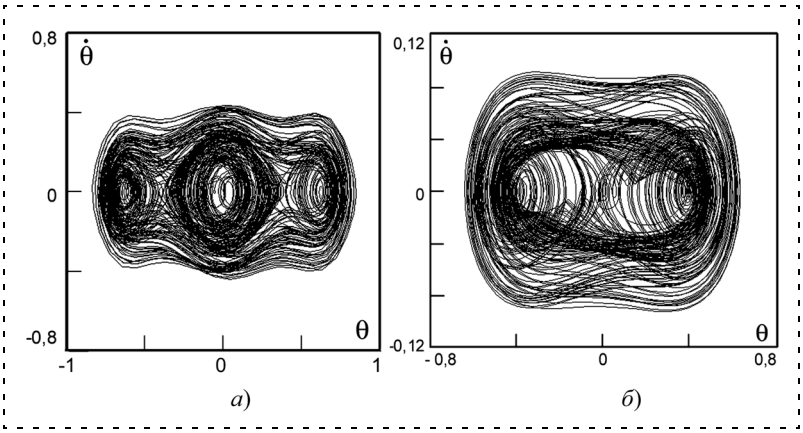


Рис. 10. Фазовые портреты трехстабильной (*а*) и бистабильной (*б*) динамических систем

С позиций синергетического подхода [11] модели хаотических систем открывают возможности реализации процессов самоорганизации. Для характеристики ситуации, определяющей нелинейную динамику объекта, можно построить *диаграмму переходов* состояний. Такая диаграмма позволяет интерпретировать сложные ситуации, возникающие в различных условиях эксплуатации. Поведение ДО как самоорганизующейся системы наиболее ярко проявляется в ситуациях, связанных с затоплением отсеков. В этом случае диаграмма представляет собой сеть, вершинами которой являются события, а ориентированные ребра задают переходы между событиями. Каждое ребро содержательно интерпретируется как алгоритмически реализуемое возмущение динамической системы, под которым понимаются как внешние (волновые) воздействия, так и изменения, происходящие в самой динамической системе в результате поступления воды внутрь корпуса. Формально диаграмма переходов состояний описывается как структура вида

$$W = \langle S,\ R,\ A,\ B,\ L \rangle,$$

где S — множество ситуаций; R — множество ребер вида $r_{ij} = (s_i, s_j)$, $i \neq j$; A — множество присоединенных атрибутивных вершин; B — множество присоединенных алгоритмических вершин; L — множество ребер вида $l = (a_i, s_i)$ или $l_{ij} = (b_i, s_j)$ или $l_{ij} = (a_i, a_j)$; $i \neq j$; $a_j \in A$, $b_j \in B$.

Результаты вычислительных экспериментов позволяют построить и проанализировать траектории системы на фазовой плоскости [7, 10] в виде аттракторов, описывающих динамику одностабильной, бистабильной и трехстабильной систем (рис. 10), а также характерные временные кривые и одномерные отображения из точек, соответствующих максимальным значениям амплитуды в различные интервалы времени для аттракторных множеств.

Исследования поведения нелинейных систем показывают, что в фазовом пространстве бифуркационные границы, по разные стороны которых система имеет качественно различный характер поведения, удобно определять с помощью сепаратрис. Применительно к задаче потери устойчивости движения сложной системы строится *поверхность сепаратрис* [18], разделяющая область влияния различных аттракторов (рис. 11). На этом рисунке фазовая траектория "пересекает" поверхность сепаратрис с устойчивыми колебаниями и оказывается в области неустойчивости (опрокидывание), кардинально меняя свое поведение.

Важную закономерность демонстрирует моделирование пространственно-временного поведения ДО на базе центральной теоремы синергетики, определяющей динамику сложной системы как взаимосвязь растущих и затухающих ее конфигураций с параметрами порядка [22, 31]. Показано, что все пространственно-временные состояния системы управляются параметрами порядка (принцип подчинения). Переход к параметрам порядка в сложной системе проводит к сжатию информации и к значительному сокращению числа степеней свободы. При этом параметры порядка определяют движение элементов системы, которые, в свою очередь, совместно (кооперативно) характеризуют

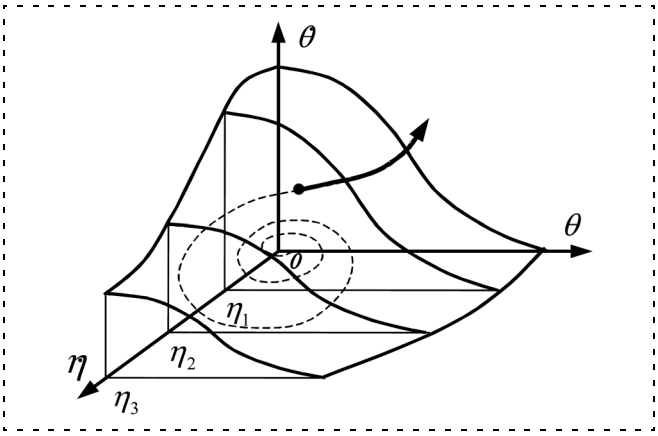


Рис. 11. Фазовая траектория и поверхность сепаратрис в трехмерном пространстве (жирной точкой отмечен момент пересечения фазовой траекторией поверхности сепаратрис)

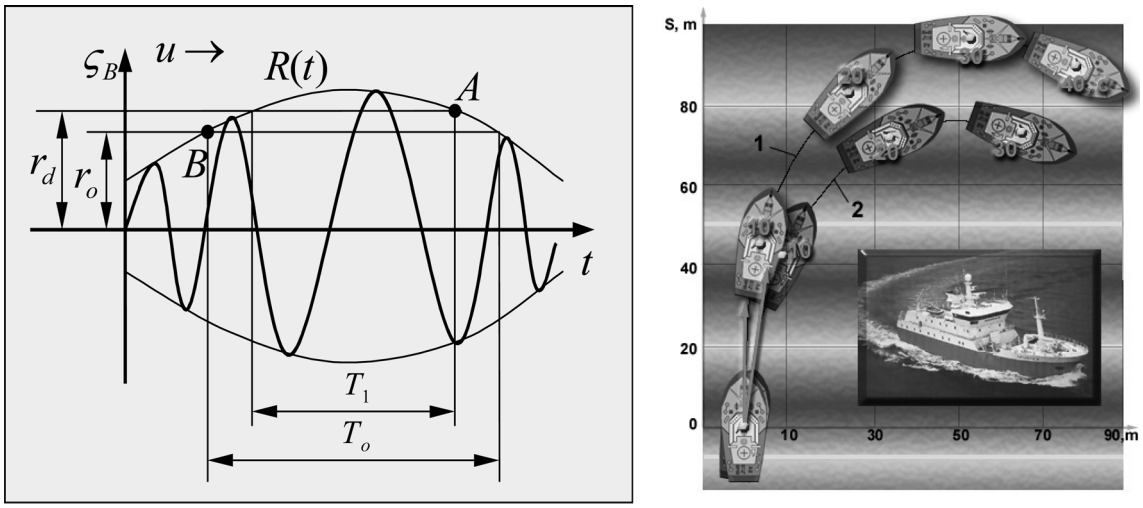


Рис. 12. "Захват" (слева) и неуправляемый разворот ДО (справа) при воздействии группы нерегулярных волн:
A — начало, *B* — выход из состояния "захвата"

действие параметров порядка (принцип круговой причинности).

Таким образом, использование методов нелинейной динамики сложных систем открывает перед исследователем объемный и многообразный нелинейный мир с новыми подходами, критериями упорядоченности и методами интерпретации сложных физических явлений. В этом мире свое место занимает нейросетевое моделирование, использующее преимущества этой вычислительной технологии в задачах аппроксимации и прогноза.

Одно из интересных приложений нелинейной теории управления связано с задачей о поведении ДО в условиях "захвата" и разворота на нерегулярном волнении, получившей название "брочинг" (broaching) [18, 32]. *Брочинг* — одна из наиболее сложных и опасных экстремальных ситуаций. Эта ситуация связана с возникновением явления "захвата" ДО попутной волной, потерей устойчивости движения, ухудшением управляемости и внезапным разворотом на волнении. Решение задачи о динамике брочинга ведется методами физического и математического моделирования с представлением результатов анализа ситуации на фазовой плоскости.

Проведенное исследование динамических картин потери устойчивости и опрокидывания ДО в условиях брочинга позволило сформулировать критериальный базис, упростить интерпретацию экстремальной ситуации и разработать алгоритм нейроуправления при принятии решений в процессе функционирования бортовой ИС контроля и прогноза мореходных качеств в условиях эксплуатации [32]. Для иллюстрации на рис. 12 представлены характеристики "захвата" и картина разворота ДО в режиме "брочинг". Динамическая граница режима "захвата" отделяет эту область от области продольно-горизонтальной качки. Динамическую область "захвата" можно трактовать как совокупность условий (элементов волнения, скорости и курса ДО), при которых теряется устойчивость режима продольно-горизонтальных колебаний.

Особенность задачи состоит в том, что эффективное управление в режиме "брочинг" возможно только в целях предотвращения возникновения этой опасной ситуации. Однако в случае ее возникновения попытки использовать управление для выхода ДО из этой ситуации могут приводить только к ее ухудшению, поскольку рулевой комплекс оказывается неэффективным в условиях полной потери управляемости [32].

Заключение

Искусство создания бортовых ИС реального времени заключается не только в построении формализованных моделей обработки информации, но главным образом в умении организовать и поставить обоснованный эксперимент при тестировании и испытании ИС. Необходимо помнить, что результат работы ИС зависит от качества и объема исходной информации, преобразование которой определяется цепочкой: "измерения—обработка—принятие решений". Все методологические принципы и грамотно проведенный анализ окажутся ненужными, если придется применять их к посредственным данным, полученным в результате использования малоэффективных алгоритмов преобразования измерительной информации или при небрежно поставленном эксперименте. При решении этих проблем важное значение имеет теория планирования эксперимента, которая, к сожалению, сейчас почти забыта и редко преподается в университетах.

Таким образом, трудности создания бортовых ИС новых поколений обусловлены не только несовершенством современных информационных технологий в части реализации адаптивных средств функционирования динамической базы знаний, но и

в значительной степени проблемами самой предметной области и психологическими аспектами, связанными с восприятием новых подходов и содержательных решений, в том числе, и с отсутствием международных стандартов, регламентирующих требования к установке и эксплуатации ИС на борту плавучих ДО.

Рассмотренные задачи нелинейной динамики связаны с применением многопроцессорных вычислительных средств анализа и интерпретации информации при функционировании бортовых ИС реального времени. Вычислительные технологии реализации этих задач отражают только незначительную область научно-технических приложений, в которых находят применение методы анализа существенно нелинейных динамических систем, синергетическая парадигма и теория детерминированного хаоса. Концептуальные основы излагаемого материала объединяют понятия устойчивости и теории колебаний и предлагают методологическое средство для совместного осмысления этих двух понятий с пояснением некоторых подходов, методов и моделей. При этом автором сделан акцент именно на те приложения, которые в настоящее время вызывают большой научный и практический интерес при исследовании сложного поведения ДО в различных экстремальных ситуациях.

Список литературы

1. **Аверкин А. Н., Батыршин А. Н., Блишун А. Ф., Силов В. Б., Тарасов В. Б.** Нечеткие множества в задачах управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
2. **Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л.** Управление хаосом: методы и приложения // Автоматика и телемеханика. 2004. № 4. С. 3—34.
3. **Андронов А. А., Витт С., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Наука, 1981.
4. **Арнольд В. И.** Теория катастроф. М.: Наука, 1990.
5. **Борисов Ю. Ю.** Построение прогнозирующих моделей динамических систем на основе исследования окрестностей реконструированных аттракторов // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 7. С. 32—37.
6. **Бородай И. К., Нецветаев Ю. А.** Качка судов на морском волнении. Л.: Судостроение, 1969.
7. **Бортовые** интеллектуальные системы. Часть 1. Авиационные системы. Часть 2. Корабельные системы. Часть 3. Системы посадки летательных аппаратов корабельного базирования. М.: Радиотехника, 2006, 2008.
8. **Васильев В. И., Жернаков С. В., Уразбахтина Л. Б.** Нейросетевой контроль параметров газотурбинного двигателя // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2001. № 1. С. 37—43.
9. **Галушкин А. И.** Теория нейронных сетей. М.: ИПРЖ, 2000.
10. **Интеллектуальные** системы в морских исследованиях и технологиях / Под. ред. Ю. И. Нечаева. СПб.: ГМТУ, 2001.
11. **Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г.** Синергетика и прогнозы будущего. М.: Наука, 1997.
12. **Красовский А. А.** Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. 1990. № 11.
13. **Лесных В. Ю.** Динамическая реконструкция временных рядов // Сб. докл. X Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM-2007. Санкт-Петербург. 2007. Т. 1. С. 199—202.
14. **Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б.** Современные проблемы нелинейной динамики. М.: УРСС, 2002.
15. **Магницкий Н. А.** Универсальная теория динамического и пространственно-временного хаоса в сложных системах // Нелинейные процессы в динамических системах. 2007. № 1. Т. 1. С. 18—39.
16. **Макаренко Н. Г.** Эмбедология и нейропрогноз // Тр. 5-й Всеросс. конф. "Нейроинформатика-2003". Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2003. С. 86—148.
17. **Неймарк Ю. И., Ланда П. С.** Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
18. **Нечаев Ю. И.** Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Л.: Судостроение, 1989.
19. **Нечаев Ю. И.** Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени // Тр. 5-й Всеросс. науч.-техн. конф. "Нейроинформатика-2003". М.: МИФИ. Лекции по нейроинформатике. Часть 2. С. 119—179.
20. **Нечаев Ю. И.** Нейроаппроксимация и нейропрогноз при контроле динамики сложного объекта // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2005. № 9. С. 22—31.
21. **Нечаев Ю. И.** Нейросетевые ансамбли при интерпретации экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2006. № 6. С. 60—69.
22. **Нечаев Ю. И.** Нелинейная динамика и парадигмы вычислений при анализе экстремальных ситуаций // Матер. междунар. конф. "Леонард Эйлер и современная наука". Российская академия наук. Санкт-Петербург. 2007. С. 385—390.
23. **Нечаев Ю. И.** Нейронечеткая система поддержки принятия решений при оценке поведения сложного динамического объекта // Тр. X-й Всеросс. конф. "Нейроинформатика-2008". Лекции по нейроинформатике. Часть 2. М.: МИФИ, 2008. С. 97—164.
24. **Нечаев Ю. И.** Нейронечеткие технологии в интеллектуальной системе контроля посадки летательных аппаратов корабельного базирования // Сб. науч. тр. XI Всеросс. науч.-техн. конф. "Нейроинформатика-2009". Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2009. С. 209—278.
25. **Справочник** теории корабля. В 3-х т. Л.: Судостроение, 1985.
26. **Уоссермен Ф.** Нейрокомпьютерная техника. М.: Мир, 1992.
27. **Boukhanovsky A., Degtyarev A., Lopatoukhin L., Rozhkov V.** Stable states of wave climate: applications for risk estimation. Proceedings of the International conference STAB'2000, Launceston, Tasmania, Australia, February, 2000. V. 2. P. 831—846.
28. **Brusov V. S., Tiumebtsev Yu. V.** High performance aircraft flight controlbased on artificial neural networks // Proc. of the RRDPAE-96. Warsaw, 1997. P. 97—100.
29. **Kimiaghalam B., Homaifar A., Bikdash M.** Pedulation suppression of a shipboard crane using fuzzy controller // Proceedings. of American Control Conference (ACC'99), San Diego, California, 1999. P. 586—590.
30. **Mitsubori K., Aihara K.** Delayed-feedback control of chaotic roll motion of a flooded ship in waves // Proceedings of conference RLA 2002. P. 2801—2813.
31. **Nechaev Yu. I.** Determined chaos in the phase portrait of ships dynamic in a seaway // Proc. of International Workshop "On the problems of physical and mathematical modeling". OTRADNOYE-93. V. 2. P. 143—145.
32. **Nechaev Yu. I., Zavyalova O. P.** Criteria basis for estimation of capsizing danger in broaching extreme situation for irregular following waves // Proc. of international conference STAB-2003. Madrid. Spain. 2005. Paper 12.
33. **Nechaev Yu. I., Degtyarev A., Anischenko O.** Ships dynamic on Wave-Breaking condition // Proc. of the 9th International conference on stability and ocean vehicles SATAB-2006. Rio de Janeiro. Brazil 2006. P. 409—417.
34. **Richards R. A.** Application of multiple artificial intelligence techniques for an aircraft carrier landing decision support tool. richards@shai.com, www.shai.com.
35. **Shuster H. G.** Deterministic chaos. Physik-Verlag. Veinhein. 1984.
36. **Takens F.** Lectures notes in mathematics. V. 898. N. Y. Springer, 1981. P. 366—381.
37. **Zadeh L.** Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM-1994. V. 37. N 3. P. 77—84.

УДК 621.865

А. Ф. Резчиков, чл.-кор. РАН, директор,
Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов,
Н. П. Митяшин, д-р техн. наук, проф.,
Б. М. Кузьмиченко, д-р техн.наук, проф.,
О. Н. Рябов, канд. техн. наук, программист,
Р. В. Карпук, аспирант,
Саратовский государственный
технический университет
mityashinnp@mail.ru

Многокритериальный выбор оборудования на основе нечеткой меры ценности критериев

Рассмотрены методы многокритериальной оценки и выбора оборудования в условиях системного взаимовлияния критериев, выражающегося в том, что некоторые сочетания свойств объекта могут увеличивать их совместную ценность по сравнению с их ценностями, рассматриваемыми по отдельности.

Ключевые слова: *нечеткая мера, многокритериальный выбор, роботизированный сборочный комплекс, интеграл Сугено, экспертный метод задания нечеткой меры.*

Введение

На практике могут встречаться случаи, когда при выборе предпочтительного варианта синтеза приходится учитывать различную ценность показателей для достижения цели проектирования. В этом случае приходится задавать систему предпочтений критериев, которая может определяться конкретными условиями задачи.

Иерархия критериев может быть задана с помощью меры g на множестве всех подмножеств пространства критериев, так что g_i выражает субъективную ценность i-го критерия для лица, принимающего решение (ЛПР). Субъективность в данном случае является относительной, поскольку ЛПР принимает решение на основании объективного анализа производственной задачи.

Мера в общем случае может быть *неаддитивной* (в другой терминологии *нечеткой* [1, 2]), для которой мера ценности некоторого набора критериев не равна сумме мер критериев этого набора. Другими словами, для нечеткой меры нарушается свойство аддитивности.

Формально нечеткой мерой называется функция множества, определенная на борелевском множестве подмножеств β базового множества X и обладающая в случае конечности X следующими свойствами [2]:

$$\text{а) } g(\varnothing) = 0,\ g(X) = 1;$$

$$\text{б) если } A,\ B \in \beta \text{ и } A \subset B, \text{ то } g(A) \leqslant g(B).$$

Частным случаем нечеткой меры является λ-нечеткая мера $g_\lambda(.)$, введенная Сугено с помощью λ-правила [1], состоящего в следующем. Для каждой пары непересекающихся подмножеств E, F множества X

$$g_\lambda(E \cup F) = g_\lambda(E) + g_\lambda(F) + \lambda g_\lambda(E) g_\lambda(F);\ -1 < \lambda < \infty.$$

При $\lambda > 0$ говорят о супераддитивной, а при $\lambda < 0$ — о субаддитивной мере. В нашем случае интересна супераддитивная мера как отражающая усиление совместной меры ценностей критериев.

Постановка задачи

Практическое использование λ-нечеткой меры осложняется трудностями ее задания. Кроме того, в приведенном определении предполагается постоянство λ для всех подмножеств исходного множества критериев X, что существенно ограничивает область применения теории.

В частности, это предположение относительно применяемой нечеткой меры используется в работе [3] при оценке сходства одномерных объектов, в работах [4, 5] — для оценки домов и экскурсионных районов. В данной статье, посвященной проблеме выбора оборудования в условиях наличия групп взаимозависимых критериев его оценки, предлагается методика экспертного задания нечеткой меры, преодолевающая указанное ограничение.

Экспертный метод задания λ-нечеткой меры

Пусть $X = \{u_i\}_{i=1}^{n}$ — множество критериев. Будем считать, что эксперты оценили меру каждого из одноэлементных подмножеств $\{u_i\}$, т. е. получен вектор $\tilde{g}_\lambda(\{u_i\}) = \tilde{g}_i$. Здесь значения $\tilde{g}_i$ являются только оценками искомых мер ценностей критериев $g_\lambda(\{u_i\}) = g_i$, и поэтому для них не выполняются свойства λ-нечеткой меры. В частности, для суммы оценок эксперту удобно принять

$$\sum_{i=1}^{n} \tilde{g}_i = 1, \tag{1}$$

хотя для супераддитивной меры должно иметь место

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = v,\ v < 1. \tag{2}$$

При небольшом n эксперты легко могут оценить меру и двухэлементных множеств, однако более об-

щим с практической точки зрения следует считать тот случай, когда экспертами заданы не все оценки двухэлементных подмножеств множества U, а только некоторые из них, индексы которых образуют множество пар $I = \{(i, j)\}$. При этом эксперту удобно задать не сами оценки $\tilde{g}_{ij}$ значений $g_{ij} = g^{\lambda}(\{u_i, u_j\})$, а "коэффициенты усиления"

$$b_{ij} = \tilde{g}_{ij}/(\tilde{g}_i + \tilde{g}_j),$$

характеризующие, насколько ценность данной пары критериев выше суммы ценностей этих критериев, взятых по отдельности. Для эксперта естественно считать, что последнее соотношение справедливо и для оцениваемых значений мер, т. е. $b_{ij} \cong g_{ij}/(g_i + g_j)$. Однако в силу λ-правила эти равенства могут выполняться лишь приближенно. С учетом этого мы можем записать для всех пар (i, j) из I следующее приближенное равенство:

$$\tilde{g}_i^{\lambda} + \tilde{g}_j^{\lambda} + \lambda v \tilde{g}_i^{\lambda} \tilde{g}_j^{\lambda} \cong b_{ij}(\tilde{g}_i^{\lambda} + \tilde{g}_j^{\lambda}).$$

Произведение λv обозначим μ. Целесообразно выбрать эту величину так, чтобы среднеквадратичная невязка правых и левых частей последнего равенства была минимальна. Воспользуемся методом наименьших квадратов.

Минимизируемая функция в данном случае имеет вид

$$f(\mu) = \sum_{i,j} (\tilde{g}_i^{\lambda} + \tilde{g}_j^{\lambda} + \mu \tilde{g}_i^{\lambda} \tilde{g}_j^{\lambda} - b_{ij}(\tilde{g}_i^{\lambda} + \tilde{g}_j^{\lambda}))^2.$$

Здесь суммирование проводится по всем парам индексов i, j, для которых выполнялись оценки b_{ij}.

Дифференцируя функцию $f(\mu)$ по μ и приравнивая результат нулю, получим уравнение относительно μ:

$$\mu = \frac{\sum_{i,j} (b_{ij} - 1)(\tilde{g}_i^{\lambda} + \tilde{g}_j^{\lambda})}{\sum_{i,j} \tilde{g}_i^{\lambda} \tilde{g}_j^{\lambda}}.$$

Это приводит к следующим значениям:

$$v = \frac{\mu}{\prod_{i=1}^{n} (1 + \mu \tilde{g}_i) - 1}; \ \lambda = \prod_{i=1}^{n} (1 + \mu \tilde{g}_i) - 1. \quad (3)$$

Задание λ_k-нечетких мер на подмножествах множества критериев

Пусть конечное множество X есть объединение N непересекающихся множеств X_k:

$$X = \bigcup_{k=1}^{N} X_k; \ X_j \cap X_k = \varnothing \text{ при } j \neq k.$$

Зададим функцию множества $g(\bullet)$ следующим образом. Для самого X и его подмножеств X_k меру будем считать аддитивной, положив

$$g(X) = 1; \ g(X_k) = G_k, \ k = \overline{1, N}; \ \sum_{k=1}^{N} G_k = 1.$$

Примем, что для каждого k функция множества $g(\bullet)$ удовлетворяет на X_k λ_k-правилу, причем λ_k могут быть различны для разных k. Тогда

$$G_k = \frac{1}{\lambda_k} \left\{ \prod_{j \in I_k} (1 + \lambda_k g_j) - 1 \right\}. \quad (4)$$

Здесь $g_j = g(\{x_j\})$ — значение функции $g(\bullet)$ на одноэлементном множестве $\{x_j\}$, соответствующем элементу x_j; I_k — множество индексов тех элементов множества X, которые входят в подмножество X_k. Теперь для произвольного множества $S \in 2^X$ положим

$$g(S) = \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{\lambda_k} \left\{ \prod_{j \in I_S^k} (1 + \lambda_k g_i) - 1 \right\}, \quad (5)$$

где I_S^k — множество индексов тех элементов множества S, которые одновременно принадлежат также и X_k.

Формулу (5) можно рассматривать либо как уравнение для определения коэффициента усиления λ_k при заданных значениях G_k и g_i $(i \in I_k)$, либо для определения значений g_i при заданных λ_k и относительных значений мер $\tilde{g}_j$.

В первом случае уравнение (10) является алгебраическим уравнением $(n_k - 1)$-го порядка относительно λ_k, где n_k — число элементов в множестве X_k. Во втором случае неизвестным является число ν, связывающее абсолютные и относительные значения мер ценностей одноэлементных множеств g_j и $\tilde{g}_j$:

$$g_j = \nu \tilde{g}_j \ (j \in I_k).$$

Формулы (3) приведены для случая, когда λ-мера задается на всем множестве выбора. Для того, чтобы распространить описанный экспертный метод нахождения λ_k для подмножеств критериев X_k, необходимо скорректировать их с учетом формулы (4).

В этом случае экспертные оценки осуществляются в каждом из выделенных подмножеств X_k и вместо формул (1) и (2) принимаются формулы вида

$$\sum_{i=1}^{n} \tilde{g}_i = G_k;$$

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = vG_k, \ v < 1.$$

Тогда вместо формул (3) следует использовать соотношения

$$v_k = \frac{\mu_k G_k}{\prod_{i=1}^{n}(1+\mu\tilde{g}_i)-1}; \ \lambda_k = \left(\prod_{i=1}^{n}(1+\mu_k\tilde{g}_i)-1\right)/G_k.$$

Применение нечеткой меры при многокритериальном выборе

В конечном счете, степень ценности критериев служит для определения значения некоторого интегрального показателя. В данной статье используется показатель, рассчитываемый с помощью интеграла Сугено [1].

Обозначим $\mu_i(x)$ степень выполнения требований по критерию $Q_i(x)$ для варианта выбора x, причем $0 \leqslant \mu_i(x) \leqslant 1$.

Будем считать, что на множестве 2^Q, где $Q = \{Q_i\}$ — множество критериев, введена нечеткая мера $g(\bullet)$, отражающая ценность всевозможных подмножеств критериев.

Рассмотрим величину $\alpha \in [0, 1]$, имеющую смысл степени выполнения требований. Для фиксированного значения α и варианта выбора x обозначим $M_\alpha(x)$ множество тех критериев Q_i, для которых степень выполнения требований проектировщика на варианте x не ниже α, т. е. $M_\alpha(x) = \{Q_i | \mu_i(x) \geqslant \alpha\}$.

Будем увеличивать значения α. Очевидно, чем больше α, т. е. чем выше уровень притязания проектировщика к степени выполнения требований, тем у́же множество $M_\alpha(x)$. При этом мера ценностей множества показателей $M_\alpha(x)$, максимальная и равная 1 при $\alpha = 0$, будет уменьшаться за счет исключения из него тех показателей, для которых $\mu_i(x)$ становится меньше α при увеличении последнего.

Для проектировщика важно, чтобы величина α была велика, но при этом не менее важно, чтобы мера ценности $g(M_\alpha(x))$ также была велика. Поскольку обе эти величины изменяются от 0 до 1, но в противоположных направлениях, компромисс будет достигнут, когда они сравняются. При этом их общее значение равно

$$S(x) = \max_\alpha \min(\alpha, g(M_\alpha(x))).$$

Данную величину, называемую в общем случае интегралом Сугено, можно считать интегральным показателем качества варианта выбора x, учитывающим меру ценности показателей (критериев) для данной области применения компоновки.

Интеграл Сугено позволяет каждому варианту выбора поставить в соответствие число из отрезка [0, 1], что позволяет многокритериальную задачу свести к скалярному выбору. Однако может представлять интерес и непосредственное сравнение двух вариантов на основе той же меры ценностей критериев, которая используется в интеграле Сугено. Для двух вариантов выбора x и y введем подмножество множества критериев

$$Q_{x,y} = \{Q_i | \, Q_i(x) \succ Q_i(y)\}, \qquad (6)$$

а с его помощью отношение $\rho(x, y) = m(Q_{xy})$. Таким образом, $\rho(x, y)$ представляет собой меру ценности тех критериев, для которых их значения на варианте x не хуже, чем на варианте y. Ассиметричное нечеткое отношение $\rho^s = \rho/\rho^{-1}$ является отношением строгого предпочтения на множестве выбора. При $\rho(x, y) > 0$ оно показывает, насколько мера ценности множества критериев $Q_{x,y}$ превосходит меру ценности множества критериев $Q_{y,x}$. Используя отношение ρ^s, построим нечеткое множество недоминируемых альтернатив $\overline{D}$ с функцией принадлежности

$$\rho_{\overline{D}}(x) = \min_y (1 - \rho^s(y, x)) = 1 - \max_y \rho^s(y, x). \qquad (7)$$

Выбор оптимального по $\rho_{\overline{D}}(x)$ варианта осуществляется по формуле:

$$x_{opt} = \arg\max \ \rho_{\overline{D}}(x). \qquad (8)$$

Пример применения методики

Теорию проиллюстрируем на примере выбора комплекса для прецизионной сборки малогабаритных электромеханических изделий. В основе такого выбора лежит информация, содержащаяся в табл. 1.

В [6] осуществлена многокритериальная оценка роботизированных сборочных комплексов для прецизионной сборки (сборки плат, малогабаритных электромеханических изделий). Рассмотрены как отечественный комплекс МРЛД (манипулятор на основе линейного шагового двигателя, входящий в систему агрегатированного сборочного оборудо-

Таблица 1

Нормализованные значения критериев

Модель	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
Cadratic 745	0,85	0,91	1	0	0,67	0	0
МРЛД	0,93	0,72	0,03	0,90	1	0,50	0,10
Ξ	0,75	0,82	0,50	1	0,80	0,20	0,58
Puma	0,67	0,78	0,70	0	0,34	0	0
Scilam	0,67	0,73	0,30	0	0,72	0	0
Cadratic 560	0,74	0,65	0,60	0	0,53	0	0
Pragma	0,34	0,60	0,30	0,50	0,20	0,05	0,20
Intermodern	0,34	0,45	0,20	0	0,44	0	0
Bosh	0,10	0	0,7	0	0,6	0	0
Sigma	0	0,2	0,8	0,3	0,5	0,05	0,20

вания АСО [7]), так и зарубежные аналоги (робот модели Sigma фирмы Olivetti, робот модели Pragma фирмы Dea, робот Cadratic 745 фирмы Sormel и другие). При этом оценку проводили по группам критериев, в каждой из которых все критерии считали равноценными.

К группе роботов, рассмотренных в [6], добавим синтезированный в [8] робот, ниже обозначаемый символом Ξ. Кроме того, к рассматриваемым в [6] пяти критериям оценки (Q_1 — погрешность позиционирования, Q_2 — скорость перемещения, Q_3 — грузоподъемность, Q_4 — модульность, Q_5 — стоимость) добавим два новых: Q_6 — агрегируемость по манипуляционным модулям, Q_7 — параллельность функционирования. Эти два критерия, учитывающие возможность наращивания числа манипуляторов и способность проводить параллельные во времени операции, введены в [8].

В табл. 1 приведены нормализованные значения критериев по методике, описанной выше.

Множество критериев разобьем на три группы. В первую введем четыре критерия, непосредственно относящихся к эффективности процесса сборки: Q_1 — погрешность позиционирования, Q_2 — скорость перемещения, Q_3 — грузоподъемность, Q_7 — параллельность функционирования.

Во вторую группу отнесем критерии, относящиеся к модульной структуре комплексов и определяющие возможность переналадки и наращивания их функциональных возможностей: Q_4 — модульность и Q_6 — агрегируемость по манипуляционным модулям. В третью группу включим единственный показатель — цену комплекса.

Ценности групп критериев, сумма которых по применяемому методу должна быть равна единице, выбираем следующим образом. Первая группа ввиду ее важности для производительности получает ценность 0,6. Существенное значение имеет стоимость комплекса и, поскольку этот критерий образует всю третью группу, эта группа получает ценность 0,3. Оставшиеся 0,1 приходятся на группу критериев, менее важную непосредственно для прецизионной сборки, но роль которых может возрасти при изменения структуры комплекса, которая потребуется при смене производственной программы.

Внутри каждой группы заказчиком задаются значения относительной меры ценности критериев в группе $\tilde{g}_i$, являющиеся оценками искомых мер ценностей критериев $g_\lambda(\{u_i\}) = g_i$. Эти оценки приведены в четвертом столбце табл. 2. Как видно из этой таблицы, неаддитивная мера вводится только в первой группе.

В соответствии с методикой расчета неаддитивной меры ценности, изложенной выше, эксперты дают оценки степеней усиления b_{ij} некоторых пар

Таблица 2

Исходные данные и результаты задания нечеткой меры

№ группы	G_k	Состав группы	Оценки заказчика $\tilde{g}_i$	Результаты расчета			
				μ	ν	λ	Ценность критерия g_i
1	0,6	Q_1 Q_2 Q_3 Q_7	0,20 0,15 0,05 0,20	2,74	0,58	4,75	0,12 0,09 0,03 0,12
2	0,1	Q_4 Q_6	0,02 0,08	0	1	0	0,02 0,08
3	0,3	Q_5	0,30	0	1	0	0,30

Таблица 3

Оценки степеней усилия b_{ij} некоторых пар критериев

Критерии	Q_1	Q_2	Q_3	Q_7
Q_1	—	1,50	—	1,10
Q_2	—	—	1,05	1,20
Q_3	—	—	—	—
Q_7	—	—	—	—

критериев. В данном случае заданы четыре значения b_{12}, b_{17}, b_{23}, b_{27} (табл. 3).

Результаты расчетов параметров нечеткой меры по методике, описанной выше, приведены в четырех последних столбцах табл. 2.

Исходя из построенной меры ценности критерия сначала применим методику непосредственного сравнения вариантов выбора, основанную на формулах (6), (7). Значения функции принадлежности асимметричного отношения ρ^s, рассчитанные с помощью построенной меры g и информации из табл. 1 для каждой упорядоченной пары комплексов (x, y), приведены в табл. 4.

Исходя из табл. 4 и применяя формулу (8), определяем оптимальный комплекс, которым является робот МРЛД. Действительно, как следует из табл. 4, этот комплекс превосходит все другие комплексы рассматриваемого списка. В частности, со степенью 0,32 он превосходит комплекс Ξ, который, свою очередь, превосходит все остальные комплексы списка.

Наиболее наглядно этот факт иллюстрирует рисунок, на котором дано графовое представление отношения ρ^s для пяти лучших комплексов. Стрелки на графе направлены от доминирующих вариантов к доминируемым.

Несколько другой результат мы получим, используя интеграл Сугено (ИС). Сводка значений ИС для всех комплексов приведена в табл. 5. Как сле-

Таблица 4

Асимметричное отношение $\rho^s = \rho/\rho^{-1}$

Модель	Cadratic 745	МРЛД	Ξ	Puma	Scilam	Cadratic 560	Pragma	Intermodern	Bosh	Sigma
Cadratic 745		0,00	0,00	0,61	0,01	0,61	0,40	0,61	0,61	0,40
МРЛД	0,57		0,32	0,57	0,57	0,87	0,49	0,87	0,87	0,49
Ξ	0,20	0,00		0,57	0,68	0,87	1,00	1,00	0,87	0,87
Puma	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,40	0,01	0,00	0,00
Scilam	0,00	0,00	0,00	0,17		0,23	0,33	0,61	0,52	0,29
Cadratic 560	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00		0,40	0,61	0,00	0,29
Pragma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,11	0,27	0,00
Intermodern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
Bosh	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,08	0,00	0,08		0,00
Sigma	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,06	0,31	0,00	

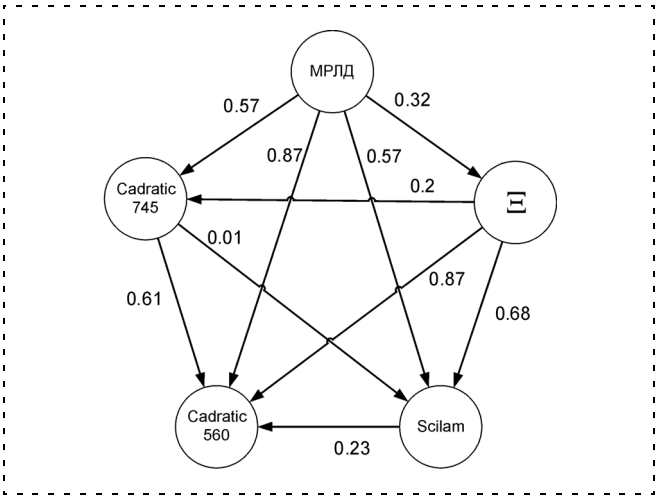
Таблица 5

Сводка значений ИС для всех комплексов

	Cadratic 745	Ξ	МРЛД	Scilam	Cadratic 560	Intermodern	Bosh	Sigma	Puma	Pragma
Значения интеграла Сугено	**0,62**	0,59	0,58	0,55	0,54	0,38	0,34	0,33	0,32	0,27

дует из табл. 5, значение ИС линейно упорядочивает комплексы, причем у комплексов Cadratic 745 и Ξ значения ИС, равные соответственно 0,62 и 0,59, несколько больше ИС комплекса МРЛД, равного 0,58. Это отличие от результата, полученного с помощью бинарного отношения ρ^s, объясняется следующим образом. Бинарное отношение учитывает лишь сам факт превосходства одного из сравниваемых комплексов над другим по группе критериев, игнорируя количественный аспект этого превосходства. Интеграл Сугено учитывает также и этот аспект. В результате этот показатель позволяет уточнить результат, полученный с помощью отношения ρ^s.

Таким образом, вместо графа мы получаем линейное упорядочение, соответствующее следованию столбцов в табл. 5.



Графовое представление отношения ρ^s

Заключение

Рассмотрены схемы многокритериального выбора, основанные на неаддитивной мере ценности критериев, задаваемой с помощью экспертов рассматриваемой предметной области. Введение такой меры вызвано целесообразностью отображения того известного из практики факта, что сочетания свойств объекта могут увеличивать или уменьшать их совместную ценность по сравнению с их ценностями, рассматриваемыми по отдельности. Учет такого системного взаимодействия критериев способствует повышению качества многокритериального выбора.

Список литературы

1. **Sugeno M.** Fuzzy measure and fuzzy integral // Trans. SICE. 1972. V. 8. N 2. P. 95—102.
2. **Нечеткие** множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Поспелова Д. А. М.: Наука, 1986. 312 с.
3. **Sugeno M., Terano T.** An approach to the identification of human characteristics by applying the fuzzy integral // Proc. of 3rd IFAC Symposium on identification and System Parameter Estimation. Hague. 1973. Part 2. P. 1064—1065.
4. **Tskamoto Y.** Identification of preference measure by means of fuzzy integrals // Ann. Conf. of JORS. 1972. P. 131—135.
5. **Sugeno M.** Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey // Fuzzy Automata and Decision Processes / Ed. by M. M. Gupta, G. Saridis, B. R. Gaines. Amsterdam: North-Holland, 1977. P. 89—102.
6. **Кузьмиченко Б. М.** Методы и средства создания агрегатно-модульной системы роботизированного сборочного оборудования в приборо- и машиностроении. Дисс. доктора техн. наук. Саратов, 1999.
7. **Кузьмиченко Б. М.** Сборочные роботы и модули типов МРЛ, МАРС и транспортно-накопительные элементы для гибкой автоматизации сборки (система АСО): Информ. материал. Саратов: НИТИ, 1990. 15 с.
8. **Кузьмиченко Б. М., Митяшин Н. П., Рябов О. Н.** Синтез моделей роботизированных сборочных комплексов модульной структуры // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 2(13). Вып. 2. С. 27—31.

УДК 658.310.11004.14:658.012.011.56.005

Г. Г.Себряков,
чл.-корр. РАН, проф., рук. подразделения,
Государственный НИИ авиационных систем, Москва
sebr@gosniias.ru

Аппроксимирующие модели деятельности человека-оператора в полуавтоматических системах управления динамическими объектами

Разрабатывается подход к построению моделей деятельности человека-оператора в динамической системе слежения на основе ортогональных функциональных нелинейных аппроксимаций.

Ключевые слова: *полуавтоматическое управление, модель деятельности человека-оператора, ортогональные функциональные аппроксимации.*

Введение

Одним из основных требований, которые предъявляются к математическим моделям вообще и к моделям деятельности человека-оператора в полуавтоматических (человеко-машинных) системах (ЧМС) управления, в частности, является требование функциональной адекватности. Это означает, что модель должна отражать свойства поведения человека, существенные с точки зрения разработчика данной конкретной ЧМС: поведение человека как звена проектируемой системы и модели должны быть в определенном смысле близкими.

Функциональный характер математических моделей поведения, используемых при проектировании, нередко позволяет абстрагироваться от самой структуры процесса слежения (структуры восприятия, переработки информации, принятия решений и т. д.).

Для обеспечения функциональной адекватности достаточно, чтобы модель и реальный человек-оператор в одинаковых условиях обладали, в некотором смысле, близкими реакциями. Поэтому при моделировании ЧМС в задачах проектирования весьма перспективным является подход, использующий идею "черного ящика".

При таком подходе алгоритмизация осуществляется на основе информации о реальных процессах слежения и предстает как задача оптимизации модели в некотором классе операторов. При этом для обеспечения адекватности модели и воспроизведения способности человека в широком диапазоне изменять алгоритмы своего функционирования необходимо предусмотреть возможность расширения класса операторов.

В основу разработки аппроксимирующих моделей может быть положен фундаментальный результат французского математика Фреше, указывающий на возможность раскрытия соотношения вход-выход нелинейных динамических систем через функциональные ряды.

Пусть требуется построить аппроксимирующую модель некоторого динамического объекта.

Оператор, определяющий связь между входным и выходным процессами моделируемого объекта, можно характеризовать однопараметрическим семейством в общем случае нелинейных функционалов F, которые при фиксированном значении параметра t каждой функции действительного переменного $x(s)$ $s \in T[t_0, t]$ ставят в соответствие число $y(t)$:

$$y(t) = F[x(s), t]. \qquad (1)$$

В связи с этим задача построения аппроксимирующей модели динамического объекта может быть математически поставлена как задача приближения в пространстве функционалов, описывающих соотношение вход-выход.

Обобщая теорему Вейерштрасса, Фреше [1] показал, что для любого непрерывного функционала (т. е. для функционала, значения которого на близких входных функциях также близки), определенного на множестве непрерывных функций, существует последовательность функционалов, которая сколь угодно точно приближает данный функционал.

В работе Бриллианта показано, что в качестве последовательности приближающих функционалов могут быть использованы функциональные ряды Вольтерра [2].

Идея использования функциональных рядов для описания нелинейных динамических систем впервые была реализована, по-видимому, Винером [3].

Позднее Винер, рассматривая задачу характеризации нелинейных систем, разработал процедуру характеризации с помощью функционалов Лагерра—Эрмита и модель в виде каскада из двух операций [4].

Исследования Винера продолжены в работах Заде [5], Бозе [6], Цеймса [7] и других. Доказана эквивалентность представления Винера и функциональных рядов Вольтерра [8].

Методы нелинейного моделирования с использованием функционалов Вольтерра и Винера, обладая большой общностью, чрезвычайно сложны в вычислительном плане. Для их реализации необходимы специализированные вычислители, поскольку использование универсальных вычислительных машин требует значительных затрат машинного времени даже при моделировании процессов в стационарных одномерных нелинейных системах.

Еще одним обстоятельством, затрудняющим в ряде случаев использование схемы Винера, является необходимость проведения испытаний объекта моделирования с использованием воздействий специального вида. Применение такой методики для исследования поведения человека-оператора в реальных условиях функционирования системы не всегда возможно. Особые трудности в связи с отмеченным обстоятельством возникают при попытках использовать метод Винера для разработки модели человека-оператора в бортовых полуавтоматических системах управления.

Ниже излагается подход к построению аппроксимирующих моделей нелинейных объектов на базе ортогональных разложений функционалов, учитывающих статистику входных процессов.

Постановка задачи

Пусть задан нелинейный многомерный динамический объект, имеющий l входов и l выходов. Требуется по известным реализациям случайных входных и выходных процессов разработать аппроксимирующую модель, адекватно описывающую соотношение вход-выход.

Обозначим X функциональное пространство реализаций векторного случайного процесса $x(t) = (x_1(t), x_2(t), ..., x_l(t))$, компонентами которого являются входные процессы рассматриваемого объекта.

В соответствии с принятой в теории случайных процессов терминологией цилиндрическими множествами в пространстве X назовем множества вида

$$\{x_0(t)\colon (x(t_1), x(t_2), ..., x(t_n)) \in \\ \in A,\ t_1, t_2, ..., t_n \in T,\ A \in B^{n\times l}\}.$$

Здесь и далее $x_0(t)$ означает выборочную траекторию (реализацию) случайного процесса $x(t)$.

Введем в пространстве X σ-алгебру B, порожденную процессом $x(t)$, как наименьшую σ-алгебру, которая содержит все цилиндрические множества. В качестве меры Лебега μ на σ-алгебре B множества X примем распределение случайного процесса (вероятностную меру), определяемое следующим соотношением:

$$\mu = P_{x_0}(c) = P\{x_0(t) \in C\},\ \forall C \in B. \qquad (2)$$

Значение введенной меры μ на множестве C определяет вероятность того, что реализация $x_0(t)$ принадлежит этому множеству.

Пусть $F[x(s), t]$ — заданный на X измеримый функционал. Тогда интеграл Лебега по мере (2) от функционала F определяет операцию усреднения по множеству реализаций случайного процесса $x(t)$:

$$\int_X F(x)d\mu = MF[x(s), t], \qquad (3)$$

где M — знак математического ожидания.

Пусть $L_2(X)$ — пространство заданных на X непрерывных и квадратично-интегрируемых по Лебегу функционалов.

$$\|F[x(s), t]\|_{L_2} = (\int_X F^2(x)d\mu)^{1/2}. \qquad (4)$$

Норму пространства $L_2(X)$ определим в соответствии с формулой (4), причем она также допускает вероятностную интерпретацию и представляет собой среднее квадратическое значение функционала, вычисленное на реализациях процесса $x(t)$:

$$\|F[x(s), t]\|_{L_2} = (MF^2\{x(s), t\})^{1/2}. \qquad (5)$$

Функционал $F(x)$ на линейном пространстве X с σ-алгеброй множеств и заданной на ней мерой, называется измеримым и квадратично-интегрируемым по Лебегу, если существует и сходится интеграл

$$\int_X F^2(x)d\mu.$$

Из соотношения (5) следует, что $L_2(X)$ представляет собой пространство всех функционалов, которые на реализациях случайного процесса $x(t)$ обладают конечным средним квадратическим значением.

Доказано [10], что бесконечномерное пространство $L_2(X)$ является полным, гильбертовым и сепарабельным. Значит, для каждого функционала $F[x(s), t] \in L_2(X)$ существует функциональная последовательность $F_n[x(s), t] \in L_2(X)$ такая, что при любом заданном $\varepsilon > 0$ будет выполняться соотношение

$$\|F[x(s), t] - F_n[x(s), t]\|_{L_2(x)} < \varepsilon. \qquad (6)$$

В соответствии с (5) сходимость последовательности F_n по метрике $L_2(X)$ к функционалу F следует понимать в среднем квадратическом, т. е.

$$\lim_{n\to\infty}\|F[x(s),\ t] - F_n[x(s),\ t]\|^2_{L_2(x)} = \\ = \lim_{n\to\infty} M(F[x(s),\ t] - F_n[x(s),\ t])^2 = 0. \qquad (7)$$

Приближение функционала в L_2 может быть осуществлено различными последовательностями функционалов.

Из сепарабельности гильбертова пространства $L_2(X)$ следует, что оно содержит полную ортонормированную систему функционалов $\{u_n[x(s),\ t]\}$, заданных на пространстве функций действительного переменного (в нашем случае — на пространстве реализаций входного процесса $x(t)$). При этом любой функционал $F(x) \in L_2(X)$ может быть представлен в виде сходящегося по норме пространства $L_2(X)$ обобщенного ряда Фурье по элементам системы $\{u_n[x(s),\ t]\}$:

$$F[x(s),\ t] = \sum_{n=0}^{\infty} c_n u_n[x(s),\ t]. \qquad (8)$$

Приведенные рассуждения служат теоретической основой для постановки задачи приближения однопараметрического семейства функционалов (1), описывающих связь между входными и выходными процессами динамических объектов.

Пусть случайные функции $x(t)$ и $y(t) = F[x(s),\ t]$, $t \in T$ имеют ограниченное среднее квадратическое значение и являются соответственно входным и выходным процессами некоторой нелинейной динамической системы. Формула (8) позволяет решить задачу статистической идентификации математической модели системы на основе аппроксимации процесса на выходе системы ортогональными функционалами, заданными на пространстве реализаций входного процесса.

Функциональные многочлены

Прежде, чем приступать непосредственно к построению аппроксимирующей модели, рассмотрим процедуру получения системы ортогональных функционалов $\{u_n[x(s),\ t]\} \in L_2(X)$.

Скалярное произведение в эвклидовом пространстве L_2 задается формулой

$$(f,\ u) = \int_X f(x)u(x)d\mu. \qquad (9)$$

Два функционала f и u называются ортогональными, если для любого $t \in T$ выполняется условие

$$(f,\ u) = 0. \qquad (10)$$

Возвращаясь к вероятностной интерпретации интеграла Лебега по мере (2), заметим, что ортогональность функционалов из L_2 означает отсутствие при совпадающих параметрах $t \in T$ корреляционной зависимости между значениями функционалов, вычисленными на одних и тех же реализациях случайного процесса.

Из выражения (9) следует, что свойство ортогональности функционалов тесно связано со статистикой процесса $x(t)$.

Рассмотрим множество G случайных процессов $g_i(t)$, которые получены из $x(t)$ путем нелинейных безынерционных преобразований, определяемых оператором:

$$g_i(t) = G_i[x(t),\ t],\ t \in T,\ i = 1,\ 2,\ \ldots\ . \qquad (11)$$

Здесь $G_i(x)$ — полиномиальные скалярные функции векторного переменного $x \in [a,\ b]$, являющиеся элементами ортонормированной системы $\{G_i(x)\}$ из гильбертова пространства $L_2[a,\ b]$ квадратично-интегрируемых действительных функций, в котором скалярное произведение введено по следующей формуле:

$$(f,\ \varphi) = \int_a^b p(x)f(x)\varphi(x)dx, \qquad (12)$$

где $p(x)$ — закон распределения (плотность вероятности) мгновенных значений случайного вектора x.

Ортонормированные системы $\{G_i(x)\}$ могут быть построены для любых весовых функций $p(x)$, обладающих свойствами плотностей вероятности.

Так, если вектор $x(t)$ распределен по нормальному закону, то скалярное произведение в $L_2[a,\ b]$ определится выражением

$$(f,\ \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty}\overset{(l)}{\ldots}\int_{-\infty}^{\infty} p(x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_l)f(x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_l) \times \\ \times \varphi(x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_l)dx_1\ dx_2\ \ldots\ dx_l, \qquad (13)$$

где $p(x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_l)$ — гауссов l-мерный закон распределения; l — размерность вектора x; x_i — i-я компонента вектора x.

В этом случае система $\{G_i\}$ представляет собой систему многочленов Эрмита l переменных.

При произвольном законе распределения вектора входных процессов $x(t)$ систему функций, ортогональных с весом, равным этому закону распределения, можно получить, осуществив процедуру ортогонализации Шмидта [9].

Поскольку функции $G_i(x)$ квадратично-интегрируемы на $B[a, b]$, процессы $g_i(t) \in G$ будут иметь ограниченное среднее квадратичное значение

$$(Mg_i^2(t))^{1/2} = \left(\int_a^b G_i^2(x)p(x)dx\right)^{1/2} = \sigma_i < \infty. \quad (14)$$

Образуем систему нелинейных функционалов $\{u_{ij}[x(s), t]\}$, подвергнув процессы $g_j(t)$ некоторым линейным динамическим преобразованиям с весовыми функциями $W_i(t, s)$, удовлетворяющими условиям

$$\int_{-\infty}^{t} W_i(t, s)ds = c_i < \infty. \quad (15)$$

Для процессов на выходе линейных преобразований имеем следующие выражения:

$$u_{ij}(t) = u_{ij}[x(s), t] = \int_{-\infty}^{t} W_i(t, s)g_j(s)ds. \quad (16)$$

Покажем, что функционалы u_{ij} — квадратично-интегрируемы по Лебегу по мере (2) и ортогональны в пространстве $L_2(X)$. Как отмечалось ранее, для этого следует доказать, что на множестве X среднее квадратичное значение функционалов ограничено и отсутствует корреляция между значениями функционалов, вычисленными на одинаковых реализациях $x(t)$.

На основании (16) имеем

$$Mu_{ij}^2[x(s), t] = M\int_{-\infty}^{t} W_i(t, s)g_j(s)ds \int_{-\infty}^{t} W_i(t, \sigma)g_j(\sigma)d\sigma =$$

$$= \int_{-\infty}^{t} W_i(t, s) \int_{-\infty}^{t} W_i(t, \sigma)Mg_j(s)g_j(\sigma)dsd\sigma.$$

Из (14) следует

$$Mg_j(s)g_j(\sigma) \leqslant \sigma_j^2 \ \ \forall\ s, \sigma \in [-\infty, t],$$

а с учетом (15) получаем

$$Mu_{ij}^2[x(s), t] \leqslant (c_i\sigma_j)^2 < \infty. \quad (17)$$

Докажем далее, что в совпадающие моменты времени значения функционалов u_{ij} и u_{kl} при $j \neq 1$ некоррелированы.

Вычислим взаимный корреляционный момент $Mu_{ij}[x(s), t]u_{kl}[x(s), t]$:

$$Mu_{ij}[x(s), t]u_{kl}[x(s), t] =$$

$$= \int_{-\infty}^{t} W_i(t, s) \int_{-\infty}^{t} W_k(t, \sigma)Mg_j(s)g_l(\sigma)dsd\sigma.$$

Входящая под знак интеграла взаимная корреляционная функция процессов $g_j(t)$ и $g_l(t)$ на выходе нелинейных преобразований в соответствии с (11) определяется следующим выражением:

$$Mg_j(s)g_l(\sigma) = \int_a^b p(x_1, x_2)G_j(x_1)G_l(x_2)dx_1dx_2, \quad (18)$$

где обозначено: $x_1 = x(s)$; $x_2 = x(\sigma)$; $p(x_1, x_2)$ — совместный закон распределения векторов x_1 и x_2.

Известно, что если x_1 и x_2 имеют одинаковые одномерные распределения, то их совместный закон распределения можно представить разложением [11]

$$p(x_1, x_2) = p(x_1)p(x_2)\sum_{\nu} G_\nu(x_1)G_\nu(x_2), \quad (19)$$

где $p(x_1)$ и $p(x_2)$ — одномерные законы распределения.

Подставив разложение (19) в (18), нетрудно убедиться, что в силу ортогональности функций $\{G_i\}$ процессы $g_j(t)$ и $g_l(t)$ при $j \neq l$ некоррелированы, т. е. что

$$Mg_j(s)g_l(\sigma) = 0 \text{ при } j \neq 1,\ s, \sigma \in\ ]-\infty, t].$$

Отсюда следует отсутствие корреляции между значениями функционалов u_{ij} и u_{kl} и их ортогональность.

Отметим, что свойство ортогональности функционалов не зависит от индексов i и k, т. е. ортогональность имеет место при произвольных импульсных переходных характеристиках линейных преобразований, удовлетворяющих условию (15). Это обстоятельство играет чрезвычайную роль в задаче идентификации аппроксимирующих моделей.

Используя выражение (16), нетрудно показать, что система функционалов $\{u_{ij}[x(s), t], t \in T\}$ является полной в $L_2(X)$ при условии, что система функций $\{G_i(x)\}$ полна в $L_2[a, b]$.

Таким образом, последовательные безынерционные нелинейные и линейные инерционные преобразования реализаций процесса $x(t) \in X$, осуществленные в соответствии с выражениями (11) и (16), определяют на множестве X с σ-алгеброй B и заданной на ней мерой (2) полную систему ортогональных функционалов

$$\{u_{ij}[x(s), t],\ t \in T\} \in L_2(X).$$

В соответствии со сказанным ранее, на основе этих функционалов могут быть образованы функциональные многочлены, которые в среднем квадратическом приближают однопараметрический функционал $y(t) = F[x(s), t]$, характеризующий выходной процесс моделируемого объекта.

Функционал u_{mn}, порожденный полиномиальной функцией $G_n(x)$, у которой высший член $x_1^{n_1} x_2^{n_2} ... x_l^{n_l}$ имеет суммарную степень, равную n, т. е. $\sum_{k=1}^{l} n_k = n$, будем называть *функционалом n-й степени*. Система $\{u_{ij}\}$ содержит в себе несколько функционалов одинаковых степеней. Число функционалов степени n определяется выражением

$$r_n = C_{l+n-1}^{l} = \frac{(l+n-1)!}{l!(n-1)!},$$

т. е. зависит как от размерности l вектора x, так и от степени n самих функционалов.

Доказанное свойство ортогональности означает, что функционалы различных степеней ортогональны, что позволяет использовать систему $\{u_{ij}[x(s), t]\}$ для аппроксимации произвольного функционала из пространства $L_2(X)$.

Назовем функциональным многочленом n-го порядка линейную комбинацию функционалов, среди которых старший имеет степень n.

Функциональная аппроксимация

Рассмотрим далее задачу аппроксимации непрерывного функционала $y[x(s), t] \in L_2(X)$, который задан на пространстве X реализаций входного процесса $x(t)$ и описывает процесс на выходе нелинейного динамического объекта. В качестве приближающего используем функциональный многочлен n-го порядка, образованный с помощью функционалов $\{u_{ij}[x(s), t]\}$.

Решение этой задачи приводит к построению аппроксимирующей модели объекта.

Из описанной процедуры получения функционалов u_{ij} следует, что структура аппроксимирующей модели должна содержать некоторый набор нелинейных безынерционных и инерционных линейных элементов.

Чтобы описание модели было компактным, воспользуемся матричной формой записи.

Для этого сформируем матрицу нелинейных полиномиальных функций

$$G = \|G_{ij}(x),\ i = \overline{0, n};\ j = \overline{1, r_i}\|_{(n+1)\times r_n}, \qquad (20)$$

и матрицу импульсных переходных функций линейных звеньев

$$W(t_1, t_2) = \|W_{ij}(t_1, t_2),\ i = \overline{1, l};\ j = \overline{0, n}\|_{l\times(n+1)}. \qquad (21)$$

Здесь у элементов матрицы G первый индекс обозначает степень полинома и, следовательно, каждая строка матрицы содержит полиномиальные функции одинаковых степеней.

Если при аппроксимации используются все функционалы m-й степени, то число отличных от нуля элементов m-й строки матрицы G равно $r_m = C_{l+m-1}^{l}$.

Некоторые элементы матрицы могут быть нулевыми.

Свяжем нелинейные и линейные элементы таким образом, чтобы на вход каждого линейного элемента с импульсной переходной функцией $W_{km}(t_1, t_2)$ поступал сигнал, представляющий собой сумму выходных сигналов всех нелинейных преобразований m-й степени. Процесс на выходе звена определится выражением:

$$u_{km}(t) = \int_{-\infty}^{t} W_{km}(t, \tau) \sum_{v=0}^{r_m} g_{mv}(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{t} W_{km}(t, \tau) g_m(\tau) d\tau, \qquad (22)$$

где $g_m(\tau) = \sum_{v=0}^{r_m} g_{mv}(\tau)$; $g_{mv}(\tau) = G_{mv}[x(\tau), \tau]$.

Процесс $u_{km}(t)$ определяет однопараметрический функционал $u_{ij}[x(s), t] \in L_2(X)$ m-й степени, ортогональный аналогичным функционалам других степеней.

Обозначим $v(t) = \|v_i(t)\|_{l\times 1}$ — вектор выхода модели. Пусть k-я компонента вектора выхода образуется путем суммирования реакций всех линейных звеньев, импульсные переходные функции которых являются элементами k-й строки матрицы W, т. е.

$$v_k(t) = \sum_{i=0}^{n} u_{ki}(t).$$

Тогда, учитывая (22), можно записать

$$v_k(t) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{r_i} \int_{-\infty}^{t} W_{ki}(t, \tau) g_{ij}(\tau) d\tau. \qquad (23)$$

При таком соединении элементов в модели k-я компонента вектора выхода представляет собой суммарный результат последовательного применения к входному сигналу $x(t) \in X$ сначала всей совокупности нелинейных преобразований $\{G_{mn}\}$, а затем линейных с импульсными переходными функциями из k-й строки матрицы W.

Матричная запись соотношения вход-выход аппроксимирующей модели имеет следующий вид:

$$v(t) = \int_{-\infty}^{t} W(t, \tau) g(\tau) d\tau, \qquad (24)$$

где $g(t) = \left\| g_i(t) = \sum_{\nu=0}^{r_i} g_{i\nu}(t) \right\|_{l \times 1}$.

Обобщенная структурная схема модели содержит нелинейную часть, которая представляет собой набор безынерционных нелинейных элементов и последовательно соединенную с ней линейную часть, состоящую из параллельных цепочек линейных динамических элементов.

Каждая из компонент вектора выхода аппроксимирующей модели является функциональным многочленом n-го порядка, образованным системой ортогональных функционалов.

Как уже отмечалось, ортогональность функционалов u_{km} не зависит от свойств порождающего их линейного преобразования. Это означает, что каждый линейный элемент аппроксимирующей модели порождает не один, а целое семейство функционалов, изоморфное множеству импульсных переходных функций.

Из отмеченного факта естественным образом вытекает постановка задачи синтеза аппроксимирующей модели: при наличии реализаций входного и выходного процессов нелинейного динамического объекта определить характеристики линейной части аппроксимирующей модели, обеспечивающие оптимальное в среднем квадратическом приближение выходного процесса.

Условия оптимальности

При таком подходе построение аппроксимирующей модели сведется к задаче подбора импульсных переходных функций линейных динамических преобразований из условия, чтобы функционал

$$E = M[(y[x(s), t] - v[x(s), t])(y[x(s), t] - v[x(s), t])^{\mathrm{T}}], \qquad (25)$$

вычисленный на реализациях входного процесса, принимал минимальное значение.

Пусть матрица $W^0(t, \tau) = \| W_{ij}^0(t, \tau) \|_{l \times (n+1)}$ минимизирует функционал (25). Всякая другая матрица импульсных переходных функций может быть представлена в виде

$$W(t, \tau) = W^0(t, \tau) + \delta W(t, \tau). \qquad (26)$$

Таким образом, импульсные переходные функции каждого из линейных звеньев модели (каждый элемент матрицы W) можно представить в виде суммы оптимальной импульсной переходной функции $W^0(t, \tau)$ и ее произвольной вариации $\delta W_{ij}(t, \tau) = \lambda_{ij} W_{ij}^*(t, \tau)$:

$$W_{ij}(t, \tau) = W_{ij}^0(t, \tau) + \lambda_{ij} W_{ij}^*(t, \tau), \quad \forall i = \overline{1, l};\ j = \overline{0, n}. \qquad (27)$$

Пусть вариации $\delta W_{ij}(t, \tau)$ принадлежат к тому же классу функций, что и импульсные переходные функции $W_{ij}(t, \tau)$, т. е. пусть $W_{ij}^*(t, \tau)$ — некоторые рациональные функции, обладающие свойствами весовых функций и удовлетворяющие условию (15), а λ_{ij} — произвольные числа.

Необходимым условием минимума функционала (25) является равенство нулю его вариации, вызванной вариацией $\delta W(t, \tau)$. Оно выражается следующими равенствами:

$$\left.\frac{\partial E}{\partial \lambda_{ij}}\right|_{\lambda = 0} = 0,\ i = \overline{1, l};\ j = \overline{1, n}, \qquad (28)$$

где $\lambda = \|\lambda_{ij}\|_{l \times (n+1)}$.

В силу положительной знакоопределенности E это условие является достаточным.

Заметим, что функционал (25) равен следу дисперсионной матрицы вектора ошибки аппроксимации

$$E = \mathrm{Sp}(M[(y - v)(y - v)^{\mathrm{T}}]).$$

Учитывая это, представим условия оптимальности в следующем виде:

$$\left.\frac{\partial E}{\partial \lambda_{ij}}\right|_{\lambda = 0} = \left.\frac{\partial}{\partial \lambda_{ij}} \mathrm{Sp}(M[yy^{\mathrm{T}} - yv^{\mathrm{T}} - vy^{\mathrm{T}} + vv^{\mathrm{T}}])\right|_{\lambda = 0} = 0.$$

Согласно выражению (24) имеем

$$\frac{\partial E}{\partial \lambda_{ij}} = \frac{\partial}{\partial \lambda_{ij}} \mathrm{Sp}\left(M\left[yy^{\mathrm{T}}(t) - \int_{-\infty}^{t} y(t) g^{\mathrm{T}}(\tau) W^{\mathrm{T}}(t, \tau) d\tau - \int_{-\infty}^{t} W(t, \tau) g(\tau) y^{\mathrm{T}}(t) d\tau + \int_{-\infty}^{t} \int_{-\infty}^{t} W(t, \sigma) g(\sigma) g^{\mathrm{T}}(\tau) W^{\mathrm{T}}(t, \tau) d\sigma d\tau \right] \right). \qquad (29)$$

Рассмотрим подробнее последнее слагаемое этого выражения. Используя перестановочные свойства линейных операций, можно записать:

$$\frac{\partial}{\partial\lambda_{ij}}\mathrm{Sp}\left(M\left[\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}W(t,\sigma)g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)W^{\mathrm{T}}(t,\tau)d\sigma d\tau\right]\right)=$$

$$=\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial\lambda_{ij}}\mathrm{Sp}(W(t,\sigma)M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))d\sigma d\tau.$$

Далее, на основании выражения (27) имеем:

$$\frac{\partial}{\partial\lambda_{ij}}\mathrm{Sp}\left(M\left[\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}W(t,\sigma)g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)W^{\mathrm{T}}(t,\tau)d\sigma d\tau\right]\right)=$$

$$=\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\sigma)}\mathrm{Sp}(W(t,\sigma)M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))\times$$

$$\times\ W_{ij}^{*}(t,\sigma)d\sigma d\tau+\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\tau)}\mathrm{Sp}(W(t,\sigma)\times$$

$$\times\ M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))W_{ij}^{*}(t,\tau)d\sigma d\tau.$$

Поскольку матрица $M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]=M[g(\tau)g^{\mathrm{T}}(\sigma)]$ симметрична, второй интеграл простой заменой переменных сводится к первому. Следовательно, окончательно имеем:

$$\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial\lambda_{ij}}\mathrm{Sp}(W(t,\sigma)M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))d\sigma d\tau=$$

$$=2\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\tau)}\mathrm{Sp}(W(t,\sigma)M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]\times$$

$$\times\ W^{\mathrm{T}}(t,\tau))W_{ij}^{*}(t,\tau)d\sigma d\tau.$$

Выполнив аналогичные преобразования, получим соответствующие выражения для остальных слагаемых в (29). В результате условия оптимальности приведутся к виду

$$\left.\frac{\partial E}{\partial\lambda_{ij}}\right|_{\lambda=0}=\left(-2\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\tau)}\mathrm{Sp}(M[y(t)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))\times\right.$$

$$\times\ W_{ij}^{*}(t,\tau)d\tau+2\int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\tau)}\mathrm{Sp}(W(t,\sigma)\times$$

$$\left.\times\ M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))W_{ij}^{*}(t,\tau)d\sigma d\tau\right)\Bigg|_{\lambda-0}=0.$$

Поскольку импульсные переходные функции $W_{ij}^{*}(t,\tau)$ произвольные, получаем:

$$\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\tau)}\mathrm{Sp}(M[y(t)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{\mathrm{T}}(t,\tau))-\int_{-\infty}^{t}\frac{\partial}{\partial W_{ij}(t,\tau)}\times$$

$$\left.\times\ \mathrm{Sp}(W(t,\sigma)M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]W^{0T}(t,\tau))d\sigma\right)\Bigg|_{\lambda-0}=0.$$

Введем обозначение:

$$\frac{\partial\mathrm{Sp}(.)}{\partial W}=\left\|\frac{\partial\mathrm{Sp}(.)}{\partial W_{ij}}\right\|_{l\times(n+1)};\ i=\overline{1,l};\ j=\overline{0,n}.\quad(30)$$

Легко проверить справедливость следующих соотношений:

$$\frac{\partial\mathrm{Sp}(BA^{\mathrm{T}})}{\partial A}=B,\ \frac{\partial\mathrm{Sp}(ABC)}{\partial B}=A^{\mathrm{T}}C^{\mathrm{T}}.\quad(31)$$

Воспользовавшись ими, запишем выражение (30) в матричной форме:

$$M[y(t)g^{\mathrm{T}}(\tau)]-\int_{-\infty}^{t}W^{0}(t,\sigma)M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]d\sigma=0.\quad(32)$$

Вследствие ортогональности компонент вектора $g(t)$ корреляционная матрица $M[g(\sigma)g^{\mathrm{T}}(\tau)]$ является диагональной, поэтому интегральное уравнение (32), представляющее собой необходимое условие оптимальности матрицы $W^{0}(t,\tau)$ весовых функций линейной части аппроксимирующей модели распадается на $l(n+1)$ независимых скалярных интегральных уравнений следующего вида:

$$M[y_p(t)g_i(\tau)]-\int_{-\infty}^{t}W_{pi}^{0}(t,\sigma)M[g_i(\sigma)g_i(\tau)]d\sigma=0,$$

$$p=\overline{1,l};\ i=\overline{0,n}.\quad(33)$$

Решением системы (33) являются оптимальные импульсные переходные функции линейной части аппроксимирующей модели. Распадение системы свидетельствует о том, что ошибки аппроксимации по каждой из составляющих векторов выхода независимы, так что импульсные переходные функции $W_{pk}^{0}(t_1,t_2)$ при фиксированном p обеспечивают оптимальную среднюю квадратичную аппроксимацию p-й компоненты вектора выхода.

Интегральные уравнения (33) содержат элементы корреляционной матрицы векторного процесса $g(t)$ на выходе нелинейной части аппроксимирующей модели, а также элементы матрицы взаимной кор-

реляции процесса $g(t)$ и процесса $y(t)$, являющегося выходом моделируемого объекта. Эти характеристики вычисляются путем статистической обработки реализаций входных и выходных процессов.

Идентификация аппроксимирующих моделей

Как следует из сказанного выше, идентификация импульсных переходных функций аппроксимирующих моделей осуществляется путем решения систем интегральных уравнений на основе статистической информации об отслеживаемых сигналах и командах управления, вырабатываемых человеком-оператором.

Известно, что задача решения интегральных уравнений первого рода, каковыми являются уравнения (33) для оптимальных импульсных функций линейных элементов аппроксимирующей модели, относится к числу некорректно поставленных математических задач.

Некорректность задачи проявляется в том, что она не обладает свойством устойчивости на множествах заданных и искомых функций: малые вариации заданных функций приводят к большим вариациям решений.

В интегральных уравнениях для импульсных переходных функций заданные функции представляют собой лишь оценки корреляционных функций, полученные в результате статистической обработки реальных процессов слежения.

Поэтому приближенные решения интегральных уравнений, т. е. импульсные характеристики линейных звеньев аппроксимирующей модели, могут как угодно сильно уклоняться от истинных.

Возникает задача создания алгоритмов построения таких решений, которые обладают свойством устойчивости к малым изменениям исходных данных.

Важно иметь в виду, что процедура идентификации аппроксимирующей модели динамических объектов не заканчивается получением решения интегральных уравнений, характеризующих необходимые условия оптимальности импульсных переходных функций линейных звеньев.

Следующий этап идентификации состоит в синтезе динамических цепей со свойствами, соответствующими вычисленным импульсным переходным функциям. На этом этапе, как правило, синтезируемая цепь представляется набором некоторых элементарных динамических звеньев, соединенных таким образом, чтобы импульсная переходная функция цепи $\widetilde{W}$ была в некотором смысле близка к функции W^0, полученной решением интегрального уравнения.

В качестве набора звеньев при синтезе цепи целесообразно использовать совокупность линейных ортогональных фильтров.

Линейные фильтры называются ортогональными, если их импульсные переходные функции $\varphi(t, \tau)$ удовлетворяют соотношениям

$$\int_0^\infty \int_0^\infty \varphi_i(t, \tau)\varphi_j(t, \tau)p(t, \tau)dtd\tau = c_{ij}\delta_{ij}, \qquad (34)$$

где $p(t, \tau)$ — некоторая вещественная положительная весовая функция; $c_{ij} = \text{const}$; δ_{ij} — символ Кронекера.

Для стационарных фильтров условия ортогональности имеют следующий вид:

$$\int_0^\infty \varphi_i(\tau)\varphi_j(\tau)p(\tau)d\tau = c_{ij}\delta_{ij}. \qquad (35)$$

При использовании ортогональных фильтров весовая функция синтезируемой цепи $\widetilde{W}(\tau)$ представляется в виде конечной суммы ряда

$$\widetilde{W}(\tau) = \sum_{n=0}^{N} a_n\varphi_n(\tau), \qquad (36)$$

коэффициенты которого a_n выбираются таким образом, чтобы обеспечить минимум критерию приближения.

Если в качестве критерия взять квадратичный критерий вида

$$J = \int_0^T \int_0^T [W^0(t, \tau) - \widetilde{W}(t, \tau)]^2 p(t, \tau)dtd\tau. \qquad (37)$$

то a_n будут коэффициентами Фурье функции $W^0(\tau)$:

$$a_n = \frac{1}{c_{nn}} \int_0^T W^0(\tau)\varphi_n(\tau)p(\tau)d\tau. \qquad (38)$$

Представление импульсных переходных функций в виде суммы ортогональных составляющих имеет важное достоинство, вытекающее из свойств ортогональных разложений: коэффициенты аппроксимации a_n не зависят от числа N удерживаемых членов разложения. Это позволяет увеличивать точность приближения путем простого добавления слагаемых.

Кроме того, ниже будет показано, что цепи, синтезированные с помощью ортогональных фильтров, изящно и компактно физически реализуются каскадными схемами, составленными из простейших динамических звеньев.

Следует отметить, что вследствие гладкости функций $\varphi(t)$ аппроксимация $W^0(t)$ суммой (36) является фактором, регуляризирующим решение интегрального уравнения (33).

Из сказанного выше следует, что за счет увеличения слагаемых в выражении (36) можно добиться удовлетворительной аппроксимации импульсной переходной функции $W^0(\tau)$. Однако коэффициенты аппроксимации a_n, обеспечивающие минимум функционала (37), вообще говоря, не будут оптимальными в смысле основного критерия идентификации (25). Поэтому более рациональным и эффективным подходом к решению задачи идентификации аппроксимирующей модели является подход, предусматривающий предварительное разложение импульсных переходных функций с последующим определением коэффициентов разложения из условия минимума критерия (25).

При таком подходе коэффициенты a_n разложения (36), вообще говоря, будут отличаться от коэффициентов Фурье, определяемых формулой (38).

Итак, представим весовые функции каждого из линейных звеньев аппроксимирующей модели конечной суммой ряда по весовым функциям ортогональных фильтров:

$$W_{ij}(\tau) = \sum_{v=1}^{N} a_{ij}^{v}\varphi_v(\tau),\ i = \overline{1, l},\ j = \overline{0, n}. \qquad (39)$$

Здесь для простоты изложения рассматривается стационарный случай, причем далее будет показано, что обобщение на нестационарные системы не представляет принципиальных трудностей.

Учитывая выражение (39), матрицу весовых функций (21) можно переписать в следующем виде:

$$W(\tau) = \sum_{v=1}^{N} A_v\varphi_v(\tau), \qquad (40)$$

где $A_v = \|a_{ij}^{v}\|_{l\times(n-1)}$ — матрицы коэффициентов.

В соответствии с (24) выражение для вектора выхода модели примет вид:

$$v(t) = \sum_{v=1}^{N} A_v \int_0^t \varphi_v(t-\tau)G[v(\tau)]E^{\mathrm{T}}d\tau. \qquad (41)$$

Значения коэффициентов разложения весовых функций a_{pr}^{k} будем находить из решения следующей задачи:

$$\min_{a_{pr}^{k}} M[(y(t) - v(t))^{\mathrm{T}}(y(t) - v(t))] =$$

$$\min_{a_{pr}^{k}} \sum_{i=1}^{l} M[(y_i(t) - v_i(t))]. \qquad (42)$$

Запишем необходимые условия экстремума:

$$\frac{\partial}{\partial a_{pr}^{k}} M[(y-v)^{\mathrm{T}}(y-v)] = M\left[\frac{\partial}{\partial a_{pr}^{k}} \sum_{i=1}^{l} (y_i - v_i)^2\right] = 0,$$

$$k = \overline{1, n},\ p = \overline{1, l},\ r = \overline{0, n}. \qquad (43)$$

Распишем более подробно выражение для вектора выхода $v(t)$:

$$v(t) = \left\| \sum_{v=1}^{N} \sum_{i,j=1}^{n} a_{ki}^{v} \int_{-\infty}^{t} \varphi_v(t-\tau)g_{ij}(\tau)d\tau \right\|_{l\times 1}. \qquad (44)$$

Введем обозначение

$$\int_{-\infty}^{t} \varphi_v(t-\tau)g_{ij}(\tau)d\tau = z_{ij}^{v}(t). \qquad (45)$$

Тогда для k-й компоненты вектора $v(t)$ можно записать

$$v_k(t) = \sum_{v=1}^{N} \sum_{i,j=1}^{n} a_{ki}^{v} z_{ij}^{v}(t),\ k = 1, l. \qquad (46)$$

Из полученного выражения следует, что от коэффициента a_{pr}^{k} зависит лишь p-я компонента вектора выхода и, следовательно, необходимые условия оптимальности будут иметь следующий вид:

$$M\left[(y_p - v_p)\frac{\partial v_p}{\partial a_{pr}^{k}}\right] = 0. \qquad (47)$$

Согласно (49), имеем

$$\frac{\partial v_p}{\partial a_{pr}^{k}} = \sum_{j=0}^{n} z_{rj}^{k}. \qquad (48)$$

Подставив выражения (45), (46) и (48) в уравнения (47) и осуществив необходимые преобразования, получим

$$\int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau)M\left[\sum_{j=0}^{n} y_p(t)g_{ri}(\tau)\right]d\tau -$$

$$- \int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau)M\left[\sum_{j=0}^{n} v_p(t)g_{ri}(\tau)\right]d\tau = 0.$$

Введем следующие обозначения:

$$\sum_{j=0}^{n} g_{rj}(t) = g_r(t);\ M[y_p(t)g_r(\tau)] = R_{y_p g_r}(t-\tau);$$

$$M[g_i(t)g_r(\tau)] = R_{g_i g_r}(t-\tau). \qquad (49)$$

Справедливы следующие уравнения, выражающие необходимые условия оптимальности:

$$\int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau) R_{y_p g_r}(t-\tau) - \sum_{v=1}^{N} \sum_{i=0}^{n} a_{pi}^{v} \int_{-\infty}^{t} \int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau) \times$$
$$\times \varphi_v(t-\sigma) R_{g_i g_r}(\sigma-\tau) d\sigma d\tau = 0.$$

$$k = \overline{1, N};\ p = \overline{1, l};\ r = \overline{0, n}. \qquad (50)$$

Необходимые условия оптимальности (50) образуют систему из $N(n+1)l$ линейных алгебраических уравнений, решения которой определяют оптимальные (в смысле минимума среднего квадрата ошибки аппроксимации вектора $y(t)$) коэффициенты a_{ij}^{k} разложения импульсных переходных функций.

Если обозначить

$$\int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau) R_{y_p g_r}(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{t} \varphi_k(\tau) R_{y_p g_r}(\tau) d\tau = B_{pr}^{k};$$

$$\int_{-\infty}^{t} \int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau) \varphi_v(t-\sigma) R_{g_i g_r}(\sigma-\tau) d\sigma d\tau =$$
$$= \int_{-\infty}^{t} \int_{-\infty}^{t} \varphi_k(\tau) \varphi_v(\sigma) R_{g_i g_r}(\tau-\sigma) d\sigma d\tau = c_{ir}^{kv}, \qquad (51)$$

то систему (50) можно записать в виде

$$B^k - \sum_v A_v C^{kv} = 0,\ k = \overline{1, N}, \qquad (52)$$

где $B_k = \| B_{ij}^{k} \|_{l \times (n-1)}$, $C^{kv} = \| c_{ij}^{kv} \|_{(n+1)\times(n+1)}$ или, более компактно,

$$AC^k = B,\ k = \overline{1, n}, \qquad (53)$$

где $A = \| A_v \|_{l \times (n+1)N}$, $C^k = \| C^{kv} \|_{N(n+1)\times(n+1)}$.

Остановимся кратко на вопросе о выборе системы ортогональных линейных фильтров.

Немаловажным при выборе фильтров является вопрос о сложности реализации. В этом отношении среди различных систем ортогональных фильтров особое место занимают фильтры, допускающие построение в виде каскадных схем из элементарных звеньев. При каскадном включении каждый отрезок цепи, содержащий v первых элементарных звеньев, образует фильтр с импульсной переходной функцией $\varphi_v(t)$. Каскад из N элементарных звеньев определяет систему из N ортогональных фильтров. Фильтр с характеристикой $\varphi_{N+1}(t)$ получается подключением дополнительного звена при неизменных элементах имеющейся цепи.

Передаточная функция каскадной схемы удовлетворяет соотношению

$$H_N(p) = \prod_{v=1}^{N} h_v(p), \qquad (54)$$

где $h_v(p)$ — передаточная функция v-го элементарного звена.

К фильтрам, которые можно построить в виде каскадных схем, относятся ортогональные фильтры Лагерра. Импульсные переходные функции этих фильтров описываются системой ортонормированных функций Лагерра

$$\varphi_v(t) = l_v(t) = \mathbf{e}^{\frac{\lambda t}{2}} \frac{d^v}{dt^v} \left(\frac{t^v}{v!} \mathbf{e}^{-\lambda t} \right), \qquad (55)$$

удовлетворяющих соотношению

$$\int_0^{\infty} l_m(t) l_n(t) dt = \delta_{mn}\ \forall\ m, n = 0, 1, 2, \ldots$$

Преобразование Лапласа функций (55) имеет вид

$$H_v(p) = L\{l_v(t)\} = \frac{\left(\frac{2p}{\lambda} - 1\right)^v}{\left(\frac{2p}{\lambda} + 1\right)^{v+1}},\ v = 0, 1, 2, \ldots \qquad (56)$$

Сравнивая выражения (56) и (54) и полагая

$$h_0(p) = \frac{1}{\frac{2p}{\lambda} + 1};\ h_i(p) = \frac{\frac{2p}{\lambda} - 1}{\frac{2p}{\lambda} + 1},\ i = \overline{1, N},$$

приходим к выводу, что фильтры Лагерра могут быть представлены каскадной схемой.

Таким образом, использование ортогональных линейных фильтров сводит задачу идентификации импульсных переходных функций аппроксимирующих моделей к задаче идентификации параметров a_{ij}^{v} разложений (39).

Известно, что человек-оператор, замыкающий нестационарный контур управления, отрабатывая сигналы с изменяющимися во времени характеристиками, ведет себя как нестационарное динамическое звено [13]. В этом случае аппроксимирующая модель человека-оператора также должна обладать нестационарной динамикой.

Нестационарность аппроксимирующей модели может быть реализована путем введения нестационарности в линейную часть. Это можно осуществить различными способами.

Матрицу импульсных переходных функций (40) линейной части аппроксимирующей модели в общем

случае (предполагая нестационарность модели человека-оператора) следует считать функцией двух переменных t и τ и представлять одним из разложений:

$$W(t, \tau) = \sum_{v=1}^{N} A_v(t)\varphi_v(\tau); \quad (57)$$

$$W(t, \tau) = \sum_{v=1}^{N} A_v\varphi_v(t, \tau). \quad (58)$$

В первом случае предполагается аппроксимировать каждый элемент линейной части модели набором стационарных ортогональных фильтров, реализуя нестационарность введением нестационарной связи между фильтрами.

Во втором случае используются нестационарные ортогональные фильтры.

С точки зрения аппаратурной или программной реализации аппроксимирующей модели более конструктивным является разложение в форме (57).

Вследствие нестационарности входных и выходных сигналов, характеризующих процессы слежения, выражения для коэффициентов (51) имеют следующий вид:

$$\begin{gathered}\int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau) R_{y_p g_r}(t, \tau) d\tau = B_{pr}^{k}(t); \\ \int_{-\infty}^{t}\int_{-\infty}^{t} \varphi_k(t-\tau)\varphi_v(t-\sigma) R_{g_i g_r}(\sigma, \tau) d\sigma d\tau = c_{ir}^{kv}(t).\end{gathered} \quad (59)$$

Уравнения (53), определяющие необходимые условия оптимальности импульсных переходных функций (57), в рассматриваемом случае принимают следующий вид:

$$A(t)C^k(t) = B^k(t) \ \forall \ t \in [0, T], \ k = \overline{1, N},$$

где

$$A(t) = \|A_v(t)\|, \ C^k(t) = \|C^{kv}(t)\|, \ B^k(t) = \|B_{ij}^{k}(t)\|. \quad (60)$$

Выражения (60) задают систему функциональных уравнений, решением которой являются элементы матрицы $A(t)$, определяющие характер изменения во времени коэффициентов связи между стационарными ортогональными фильтрами в линейной части аппроксимирующей модели.

При фиксации момента времени уравнения (60) обращаются в систему линейных алгебраических уравнений, которая может быть решена теми же методами, что и система (53).

Заключение

Аппроксимирующие модели обладают целым рядом свойств, делающих их удобным и конструктивным инструментом моделирования нелинейных динамических систем.

К достоинствам аппроксимирующих моделей относится тот факт, что для их построения не требуется априорных сведений о внутренней структуре моделируемого объекта. Это особенно важно при решении таких задач, как формализация поведения человека-оператора в ряде ситуаций управления, а также задач моделирования иных биологических объектов. В аппроксимирующих моделях имеется возможность повышать адекватность описания реального объекта за счет повышения порядка приближающего функционала добавлением в модель элементов, осуществляющих над входным процессом полиномиальные преобразования более высоких степеней.

Важно подчеркнуть, что при таком расширении класса приближающих функционалов оптимальные характеристики ранее синтезированных элементов остаются неизменными. Это упрощает процедуру построения модели и позволяет путем постепенного наращивания ее сложности добиваться требуемой точности моделирования.

В последующих публикациях автор надеется привести конкретные примеры моделей деятельности человека-оператора при управлении динамическим объектом.

Список литературы

1. **Frechet M.** Sur les fonctionnelles // Ann. de l'Ecole Normale sup. 3-me ser. V. 27. 1910.
2. **Brilliant M.** Theory of the analysis of nonlinear systems // Technical Report, 345, MIT, 1958.
3. **Wiener N.** Response of a nonlinear devise to noise // Report V-165. Radiation Laboratory, MIT. 1942.
4. **Винер Н.** Нелинейные задачи в теории случайных процессов. М.: ИЛ, 1961.
5. **Zaden L.** On the representation of nonlinear operations // IRE. Pt. 2. 105. 1957.
6. **Bose A.** A theory of nonlinear systems // Technical Report 309. Res. Lab of Electronics. MIT, 1960.
7. **Zames G.** Nonlinear operators for systems analysis / Sc. D. Thesis, Dept. of Elec. Eng., MIT, 1960.
8. **Chesler D.** Nonlinear Systems with Gaussian Inputs // Technical Report 366, Res. Lab. of Electronic. MIT, 1960.
9. **Пупков К. А., Капалин В. И., Ющенко А. С.** Функциональные ряды в теории нелинейных систем. М.: Наука, 1976.
10. **Колмогоров А. Н., Фомин С. В.** Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1963.
11. **Крамер Г.** Математические методы статистики. М.: Мир, 1976.
12. **Себряков Г. Г.** Характеристики деятельности человека-оператора в динамических системах слежения и наведения летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 11. С. 2—8.

УДК 681.5+004.896

И. Г. Фархатдинов, аспирант,
Ю. В. Подураев,
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
МГТУ "СТАНКИН",
Дж.-Х. Ю, проф.,
директор лаборатории "БиоРобототехники",
Корейский университет технологии
и образования, Южная Корея
ildar.info@gmail.com

Экспериментальное исследование позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления в системах дистанционного управления мобильными роботами

Описаны результаты экспериментального исследования позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов дистанционного управления мобильными роботами. Приводятся результаты сравнительного анализа качества систем дистанционного управления при позиционном, скоростном и комбинированном режимах. Также изучено влияние типа человеко-машинного интерфейса и способов представления информации человеку-оператору на качество дистанционного управления. Представлены результаты двух экспериментов: позиционирование мобильного робота и управление мобильным роботом в среде с большим числом препятствий.

Ключевые слова: *дистанционное управление, мобильный робот, человеко-машинный интерфейс*

Введение

Системы дистанционного управления (ДУ) роботами широко применяются в современном машиностроении, энергетике, науке, медицине, космонавтике. В таких системах человек-оператор (ЧО) управляет роботом, находящимся в удаленной среде, с помощью задающего устройства (ЗУ) [1]. В последнее время активно применяется ДУ мобильными роботами (МР). Известно множество публикаций, посвященных системам ДУ МР [2—5]. Однако в указанных исследованиях большое внимание уделяется разработке и исследованию человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ), основанных на системах отражения усилия и системах технического зрения, и практически не изучены вопросы влияния ЧМИ и режимов ДУ МР на качество выполняемых задач. В большинстве предыдущих исследований для ДУ МР использовался скоростной режим управления, который является традиционным для подобных систем. В данной статье авторы проводят качественный анализ влияния различных режимов управления и ЧМИ на производительность и точность системы. Предложен комбинированный позиционно-скоростной режим ДУ МР, и при различных типах ЧМИ экспериментально исследовано влияние позиционного, скоростного и комбинированного режимов на качество работ, выполняемых при ДУ МР.

1. Краткое описание системы ДУ МР

Рассматривается система ДУ колесным МР. ЧО управляет МР посредством изменения положения ЗУ. Управляющие сигналы передаются на контроллер МР по каналам беспроводной связи. На рис. 1 показаны конфигурации ЗУ (*а*) и МР (*б*). Управляющие сигналы формируются на основании измеренного положения ЗУ (x_m, z_m). На рис. 1, *б*, V — скорость МР; φ — угол поворота, отчитываемый от оси фиксированной системы координат (СК); S — путь, пройденный роботом. На МР помимо датчиков положения на приводах колес могут быть также установлены системы измерения расстояния от корпуса робота до объектов, окружающих робот. Примером таких систем могут служить датчики расстояния с инфракрасными излучателями и приемниками или лазерные сканеры. Расстояние до препятствий, измеренное датчиками, пересылается на пульт управления и отображается ЧО посредством воспроизведения усилия на активном ЗУ. В рассматриваемой системе ДУ МР также предполагается наличие видеокамер и мониторов, которые позволяют ЧО получать видеосигналы из удаленной среды.

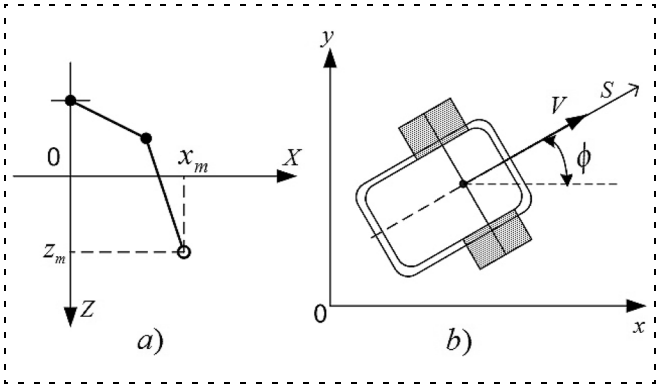


Рис. 1. Схема задающего устройства и мобильного робота при ДУ (вид сверху)

2. Режимы управления

2.1. Скоростное и позиционное управление

В системах ДУ МР в большинстве случаев используется режим управления по скорости [2, 3]. В данном режиме управления положение ЗУ определяет

желаемую скорость МР. Такой режим управления кратко описывается следующим уравнением:

$$\begin{pmatrix} V \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_V & 0 \\ 0 & k_\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где q_1, q_2 определяют положение ЗУ; k_V и k_ω — коэффициенты масштабирования; q_1, q_2 определяют положение ЗУ с учетом искусственно введенной мертвой зоны:

$$q_1 = \begin{cases} -z_m, & |z_m| > z_{dz}; \\ 0, & |z_m| \leqslant z_{dz}; \end{cases} \quad (2)$$

$$q_2 = \begin{cases} x_m, & |x_m| > x_{dz}; \\ 0, & |x_m| \leqslant x_{dz}. \end{cases} \quad (3)$$

Размеры мертвой зоны задаются величинами z_{dz} и x_{dz}. Мертвая зона вводится в систему ДУ для повышения безопасности.

Позиционный режим управления описывается следующим уравнением:

$$\begin{pmatrix} S \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_S & 0 \\ 0 & k_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где k_S и k_A — коэффициенты масштабирования. Подобная стратегия управления применяется в ДУ роботами-манипуляторами [1] и не характерна для ДУ МР. Это обусловлено трудностями при согласовании ограниченной рабочей зоны ЗУ с практически неограниченной рабочей зоной МР. При этом позиционное управление по сравнению со скоростным управлением позволяет четко задавать желаемую позицию МР при ручном ДУ. Поэтому комбинированный режим, в котором управление может последовательно происходить как по скорости, так и по положению, позволит ЧО поочередно задавать желаемую скорость и положение МР в удаленной среде.

2.2 Комбинированный режим управления

В комбинированном режиме управления ЧО предоставляется возможность последовательно переключаться между управлением по скорости и управлением по положению [5]. Для этого ЗУ должно обладать некоторым двухпозиционным переключателем, который обеспечивает работы в двух режимах: скоростной режим ДУ и позиционный режим ДУ.

В скоростном режиме ЧО имеет удобную возможность остановить МР в некотором положении за счет наличия мертвой зоны в СК ЗУ. Для этого необходимо перевести ЗУ в мертвую зону, заданную вокруг начала СК ЗУ. Однако в скоростном режиме управления у ЧО нет непосредственной возможности точно задавать или корректировать желаемое положение и ориентацию МР. Для обеспечения этой возможности необходимо управлять МР по положению, т. е. осуществлять ДУ в позиционном режиме. Таким образом, позиционный режим управления является более точным для управления МР. Недостатком позиционного управления является крайне высокая чувствительность контроллера робота к относительно небольшим приращениям положения ЗУ, вызванная необходимостью использовать большие значения коэффициентов масштабирования. В рассматриваемом комбинированном режиме управления ЧО самостоятельно принимает решение о том, какой из режимов (позиционный или скоростной) должен быть активирован в тот или иной момент времени. Скоростной режим управления удобен в случаях, когда необходимо осуществить быстрое перемещение робота на большое расстояние. Позиционный режим подходит, когда необходимо с достаточной точностью переместить МР в заданное положение в ограниченном пространстве.

Для корректного переключения между режимами управления необходимо обеспечить соответствующий сброс и перенос начала СК ЗУ. При каждом переключении необходимо восстанавливать новую СК ЗУ с началом в текущем положении ЗУ. При этом направление осей новой СК остается неизменным. Подробно алгоритм сброса и переноса СК ЗУ описан в [6].

3. Человеко-машинные интерфейсы в системах ДУ МР

В системе ДУ МР с комбинированным режимом управления для обеспечения выбора наиболее оптимального режима ЧО важно обладать достаточным набором информации о состоянии МР и удаленной среды. Передачу и отображение такой информации ЧО обеспечивают человеко-машинные интерфейсы (ЧМИ). Поэтому важной задачей является исследование взаимовлияния различных режимов управления и типов ЧМИ в системе ДУ МР. Под типами ЧМИ мы понимаем различные способы отображения информации.

3.1. Визуальная информация

В большинстве систем ДУ МР ЧО имеет возможность непосредственно наблюдать за роботом, либо следить за его работой с помощью видеосис-

тем, которые отображают некоторую визуальную информацию. Видеоинформация может быть представлена ЧО в двух видах: текстовом и графическом. Скорость, положение, ориентация, расстояние до объектов и т. д. удобно представлять в текстовом виде. С помощью графической информации удобно представлять интерактивную карту удаленного пространства, в которое помещен МР, а также изображение с видеокамер, установленных на МР.

3.2. Система отражения усилий

Для обеспечения надежного и безопасного ДУ МР применяют системы отражения усилий и активные ЗУ. Такие системы посредством воспроизведения соответствующих усилий на ЗУ позволяют отображать информацию о направлении и расстоянии до препятствий. При этом направление вектора воспроизводимой силы будет противоположно направлению от МР до препятствия, а амплитуда вектора силы будет обратно пропорциональна расстоянию до препятствия. Таким образом, система отражения усилия воспроизводит силу на ЗУ, действующую на руку ЧО и указывающую направление, позволяющее МР безопасно перемещаться в удаленном пространстве без столкновений с объектами этой среды. Описанная выше сила вычисляется по следующей формуле:

$$F_e = \begin{cases} \dfrac{k_e}{L}, \; L < L_0; \\ 0, \; L \geqslant L_0, \end{cases} \tag{5}$$

где k_e — коэффициент масштабирования; L — расстояние до препятствий; L_0 — фиксированное минимальное расстояние до препятствия, при прохождении которого начинает воспроизводиться сила F_e.

Также в системах отражения усилий часто используют силы, стремящиеся вернуть ЗУ в начальное положение. Такая сила описывается следующим образом:

$$F_{init} = -k_{init} z_m, \tag{6}$$

где F_{init} — инициализирующая сила; k_{init} — коэффициент масштабирования. Такая сила полезна при скоростном режиме ДУ. Если ЧО прекращает управлять МР, то благодаря этой силе ЗУ автоматически возвращается в начальное нулевое положение, что означает полную остановку МР. Кроме того, согласно формулам (1) и (2) сила F_{init} пропорциональна скорости МР V, что означает, что сила F_{init} также отражает информацию о текущей скорости МР. Очевидно, что в позиционном режиме отражать силу F_{init} не имеет смысла. Таким образом, общая сила, воспроизводимая на ЗУ, описывается как сумма двух сил:

$$F = F_e + iF_{init}, \tag{7}$$

где $i = 0$ в позиционном режиме ДУ и $i = 1$ — в скоростном режиме ДУ. При скоростном режиме управления, когда $i = 1$, теоретически возможно, что $F_e = F_{init}$, что приводит к нулевой результирующей силе (7). Это возможно только в случае, когда $z_m = -k_e/k_{init}/L$, что на практике маловероятно, и поэтому данный случай нами не рассматривается. В экспериментах, описанных далее, используются следующие значения коэффициентов: $k_e = 0{,}5$ Н · м, $k_{init} = 10$ Н/м.

4. Эксперимент

4.1. Экспериментальная установка

Для исследования влияния режимов управления и различных типов ЧМИ на качество выполнения задач при ДУ МР была разработана экспериментальная установка, и с ее помощью проведен ряд экспериментов. ЧО управлял МР посредством изменения положения активного ЗУ. Настольный манипулятор Phantom Premium 1.5A был использован в качестве активного ЗУ, две линейные степени свободы в горизонтальной плоскости — для управления линейной и угловой скоростями МР (рис. 1). С помощью двухпозиционного переключателя на рукоятке манипулятора переключали режимы управления. ЗУ было подключено к персональному компьютеру с управляющей программой, обеспечивающей формирование сигналов управления для МР. Алгоритм и структура управляющей программы подробно описаны в [6]. Для обмена управляющими и информационными сигналами между компьютером применяли TCP/IP протокол и беспроводную компьютерную сеть. В качестве МР была использована мобильная платформа Pioneer 3DX от компании Activmedia.

Для отображения текстовой и графической информации использовали видеомонитор и специально разработанную программу. С помощью текста отображали числовую информацию о состоянии МР, в графическом виде — видеосигналы с камер, установленных на МР. Инфракрасные датчики расстояния, установленные на корпусе МР, измеряли расстояние до объектов вокруг робота и передавали полученную информацию на управляющий компьютер. В свою очередь, компьютер формировал управляющие сигналы для активного ЗУ согласно формуле (5).

На рис. 2, *а* показан ЧО, управляющий ЗУ. На рис. 2, *б* показан МР с двумя видеокамерами. Первая камера установлена на небольшой мачте, что позволяло получать изображение общего вида МР и пространства вокруг него. Вторая камера установлена на передней части МР и направлена вниз непосредственно на область пространства перед МР и его передним бампером. Бампер использовали для осуществления простых манипуляций над объектами. На рис. 2, *в* показаны видеоизображения с камер, которые ЧО видел на экране монитора.

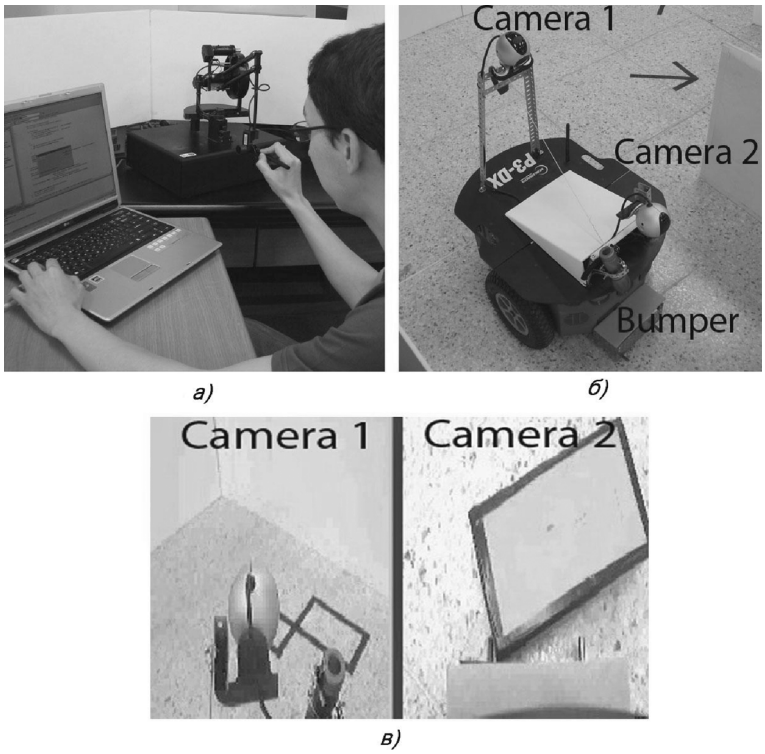


Рис. 2. ЧО управляет ЗУ (*а*); МР с видеокамерами (*б*); видеоизображение, получаемое с видеокамер (*в*)

В эксперименте по ДУ МР принимали участие пять человек. Перед экспериментом был проведен инструктаж, который включал в себя объяснение принципов скоростного, позиционного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления. Каждый участник дополнительно проводил по две тренировочные попытки ДУ МР для каждого режима управления, после чего участник приступал к настоящему эксперименту. Эксперимент проводили по три раза для каждого ЧО, при этом в отчет о результатах вносили средние арифметические значения измеренных показателей.

В экспериментах использовали следующие значения управляющих параметров: $k_V = 5$ с$^{-1}$, $k_\omega = -0{,}5$ °/мм/с, $k_S = -40$, $k_A = -2$ °/мм (для эксперимента, описанного в разделе 4.2). Для эксперимента, описанного в разделе 4.3, значения коэффициентов масштабирования k_S и k_A были выбраны меньше: −1,5 и −0,25 °/мм, соответственно. Это позволяло осуществлять более точное ДУ МР. При этом была реализована возможность сброса СК ЗУ для переноса ее начала в новое положение, что позволяло избежать проблем при установлении соответствия между СК ЗУ и рабочей зоной МР. ПД-регуляторы использовали как для управления скоростью, так и для управления положением МР. Во всех экспериментах управление МР Pioneer 3DX осуществляли путем задания желаемой скорости. В скоростном режиме ДУ желаемую скорость МР вычисляли как функцию положения ЗУ. В позиционном режиме желаемую скорость МР вычисляли как функцию ошибки между желаемым и текущим положениями МР.

В эксперименте по позиционированию МР абсолютная линейная скорость была ограничена величиной 700 мм/с. В эксперименте по ДУ МР в среде с большим числом препятствий скорость не превышала 400 мм/с.

4.2. Позиционирование МР

В этом разделе описан эксперимент по оценке качества позиционирования МР в зависимости от режима управления и типа ЧМИ. Под задачей позиционирования МР мы понимаем перемещение МР в заданное желаемое положение. Экспериментально исследовано, какой из описанных в разделе 2 режимов управления обеспечивает выполнение задачи за меньшее время, т. е. обладает большей производительностью. В эксперименте ЧО была поставлена задача прямолинейного перемещения МР на 6 м как можно более точно с минимальными временными затратами.

В первой серии экспериментов МР был помещен в среду без посторонних объектов и препятствий. В этом случае применялся ЧМИ без системы отражения усилий. Информацию о текущем положении МР отображали на экране управляющего компьютера в текстовом виде. В ходе эксперимента измеряли время, требуемое на выполнение задачи позиционирования. Результаты эксперимента, проведенного с одним ЧО, представлены на рис. 3:

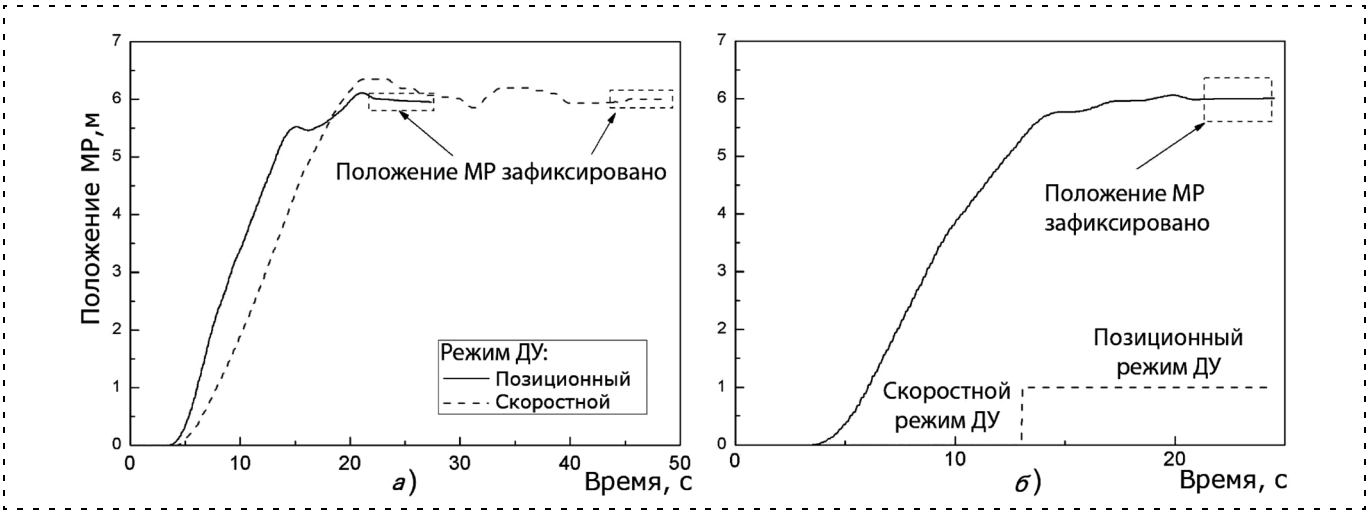


Рис. 3. Экспериментальные результаты позиционирования МР при использовании ЧМИ только с текстовым отображением информации

а — графики изменения положения МР при позиционном и скоростном режимах ДУ; *б* — график изменения положения МР при комбинированном позиционно-скоростном режиме управления.

Для выполнения задачи позиционирования в скоростном режиме ДУ потребовалось примерно 43 с. Сначала ЧО с помощью ЗУ задавал некоторое значение желаемой скорости, по мере приближения к цели ЧО приводил ЗУ в начальное нулевое положение и в итоге останавливал МР. В позиционном режиме управления потребовалось примерно 25 с для позиционирования робота. В этом случае ЧО мог непосредственно осуществить перемещение МР в заданную точку путем перевода ЗУ в соответствующее положение. Однако МР перемещался в желаемое положение с некоторой задержкой, связанной с большой инертностью МР.

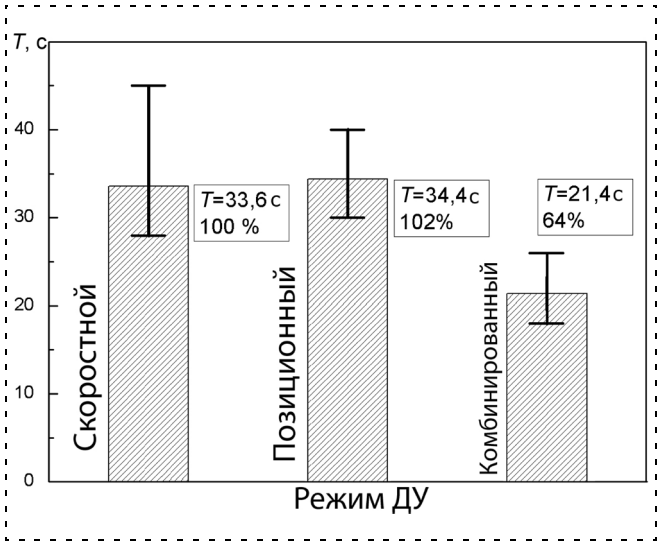


Рис. 4. Средние значения времени, требуемого для позиционирования МР

При комбинированном ДУ (рис. 3, *б*) сначала использовался скоростной режим управления, который обеспечил быстрое перемещение МР в желаемую зону, после чего был активирован позиционный режим управления. Переключение между режимами произошло примерно на 13 с. Позиционный режим позволил точно задать и зафиксировать положение МР. Совместное использование режимов позволило сократить временные затраты на выполнение задачи позиционирования.

На рис. 4 представлены средние результаты позиционирования МР, полученные в экспериментах с пятью различными ЧО*. Среднее время, требуемое для выполнения задачи позиционирования, было наименьшим при комбинированном режиме управления. Применение комбинированного режима управления сократило временные затраты на 36 %.

На графиках на рис. 3 видно, что качество и точность позиционирования отличается в каждом из экспериментов. Для исследования влияния режима ДУ на точность позиционирования был проведен дополнительный эксперимент. ЧО должен был так же, как и в предыдущем случае, переместить МР на 6 м вперед, однако в этот раз на расстоянии 6,5 м от начального положения МР было установлено препятствие. Информация о препятствии отображалась ЧО с помощью системы отражения усилия. Было изучено влияние типа ЧМИ и режима ДУ на точность позиционирования МР. Для

*На рис. 4 и далее на рис. 6 и 9 смысл вертикальных отрезков на диаграммах — разброс максимальных и минимальных результатов измерений, полученных при экспериментах с различными ЧО. Верхний и нижний концы отрезков соответствуют максимуму и минимуму измерений.

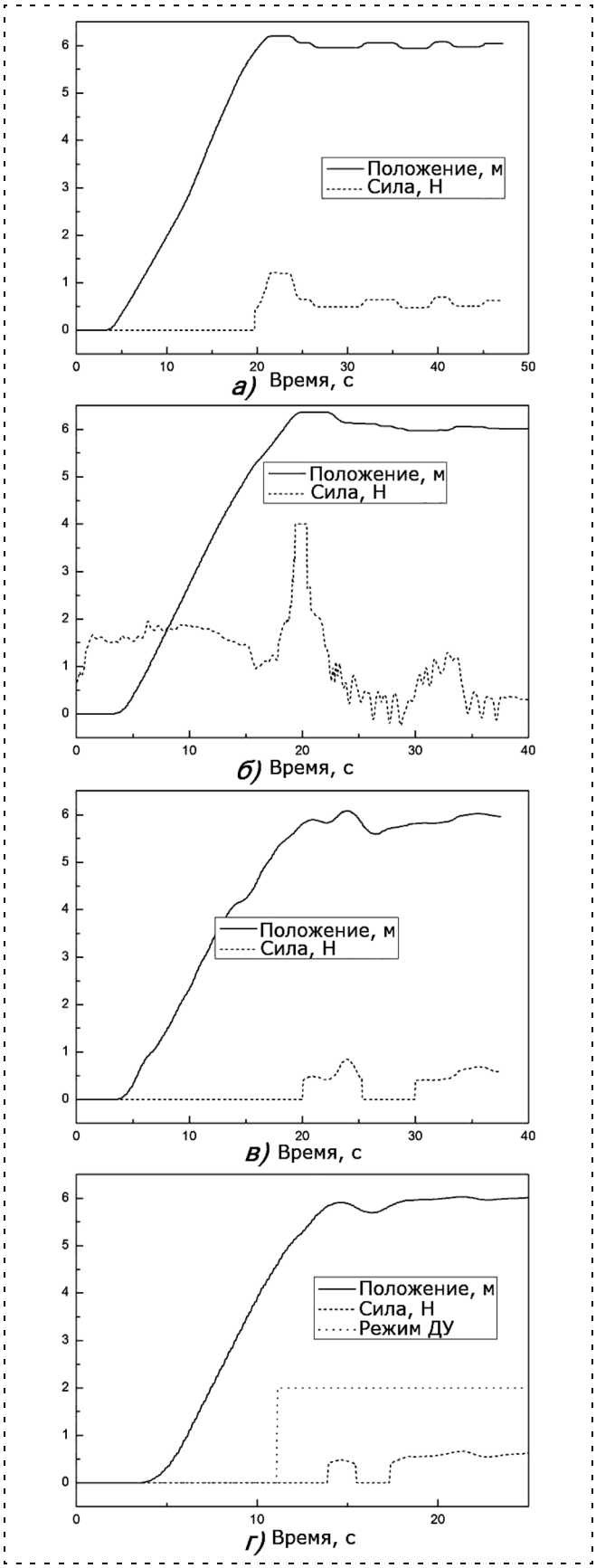


Рис. 5. Экспериментальные результаты позиционирования МР при использовании ЧМИ с текстовым отображением информации и с системой отражения усилий:
а и *б* — скоростной режим ДУ; *в* — позиционный режим ДУ; *г* — комбинированный режим ДУ

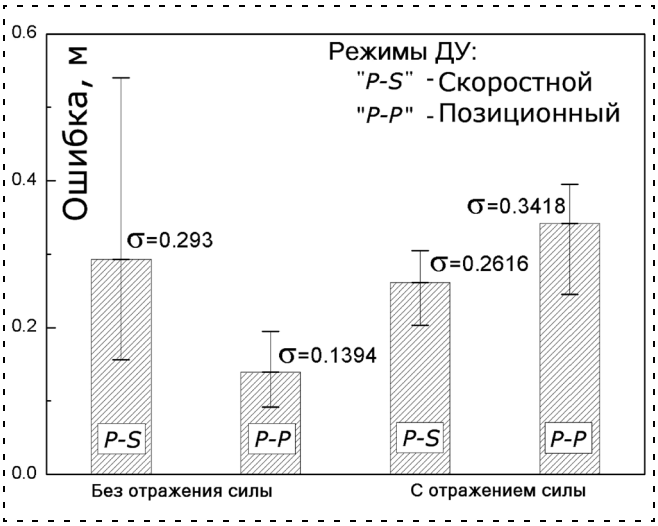


Рис. 6. Средние значения ошибки позиционирования МР

каждого эксперимента была посчитана усредненная ошибка:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_{des}-x_i)^2}, \qquad (8)$$

где N — число измеряемых точек; x_{des} и x_i — желаемое и текущее положения МР, соответственно. Вычисленная таким образом усредненная ошибка дает возможность численно оценить точность и качество позиционирования. Результаты эксперимента с одним ЧО представлены на рис. 5. Средние результаты эксперимента для пяти ЧО представлены на рис. 6. Наименьшая ошибка позиционирования была достигнута при позиционном режиме ДУ без применения системы отражения усилий. Наибольшая ошибка была получена при позиционном ДУ с применением системы отражения усилий. При скоростном режиме ДУ наличие системы отражения усилий повысило точность, в то время как для позиционного режима ДУ наличие системы отражения усилий было критическим.

4.3. ДУ МР в среде с большим числом препятствий

Для более полного и реалистичного исследования влияния режимов ДУ на точность и производительность МР был проведен эксперимент по ДУ МР в специально построенной удаленной среде. На рис. 7 схематически показана карта удаленной среды. Каждому ЧО была поставлена задача по перемещению МР из "Комнаты 1" в "Комнату 2", после чего было необходимо с помощью бампера МР осуществить перенос "Объекта 1" и "Объекта 2" в заранее определенные желаемые положения, кото-

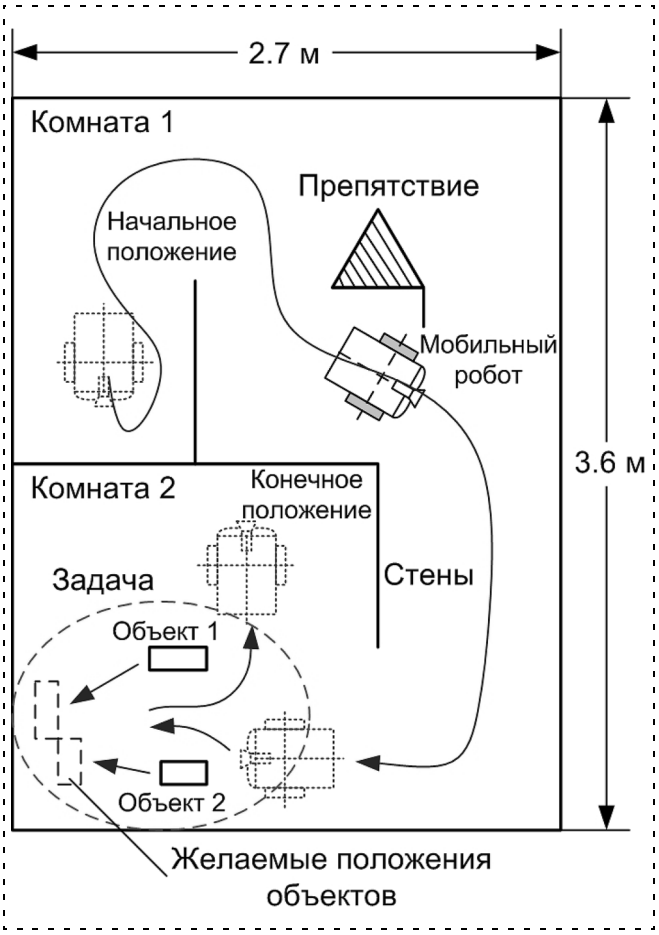


Рис. 7. Карта удаленной среды и схема задания для эксперимента

рые были визуально отмечены на полу. На рис. 8 показан МР после выполнения задачи (рис. 8, *а*) и способ измерения точности позиционирования объектов (рис. 8, *б*). Сначала измеряли расстояния *a*, *b*, *c* и *d*, после чего вычисляли среднюю ошибку:

$$e = \frac{a+b+c+d}{4}. \qquad (9)$$

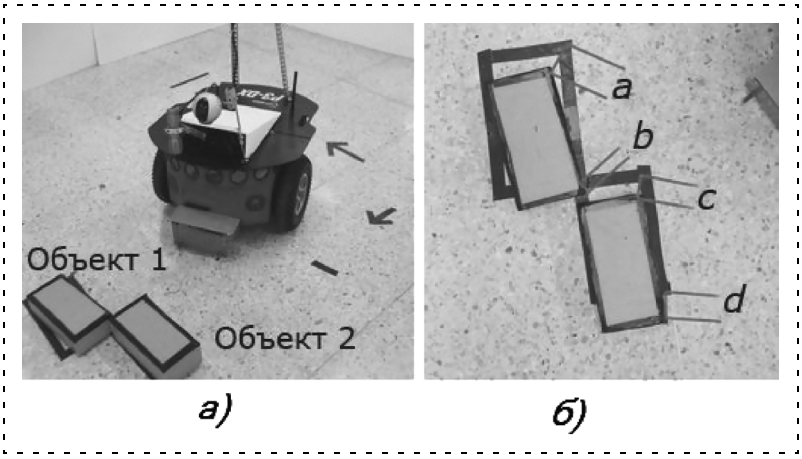


Рис. 8. МР после выполнения задачи (*а*) и схема измерения ошибки (*б*)

Ошибка позволяла численно оценить точность системы ДУ МР, а время, требуемое на выполнение задачи, позволяло оценить производительность системы.

5. Анализ результатов экспериментов

5.1. О роли текстовой информации

При ДУ МР на экране компьютера ЧО мог видеть значения положения и скорости МР. В скоростном режиме управления среднее время выполнения задачи составляло 33,6 с (см. рис. 4). В этом случае система отражения усилия не применялась, и поэтому ЧО не мог получать информацию о наличии возможных препятствий на пути робота. В целях безопасности ЧО не управлял МР на больших скоростях, вследствие чего МР двигался относительно медленно, и потребовалось больше времени на завершение позиционирования. Также важно отметить, что в скоростном режиме управления, несмотря на то, что ЧО мог отслеживать положение МР на экране монитора, было достаточно сложно остановить МР на требуемом расстоянии (см. рис. 3, *а*). В результате точность позиционирования при скоростном режиме ДУ с текстовым ЧМИ составила 0,293 м (см. рис. 6).

На рис. 3, *а* показан график изменения положения МР при позиционном режиме ДУ. В этом случае среднее время выполнения задачи составило 34,4 с (см. рис. 4). ЧО мог непосредственно управлять положением МР, в результате позиционирование МР было более точным. Средняя ошибка составила 0,1394 м (см. рис. 6). Максимальная точность была достигнута благодаря применению позиционного режима управления и отсутствию системы отражения усилий.

В последнем эксперименте с текстовым отображением информации применяли комбинированный режим управления (см. рис. 3, *б*). Для переключения от скоростного режима к позиционному ЧО с помощью текстовой индикации отслеживал положение МР. Как только робот находился вблизи желаемого положения, ЧО переключался к позиционному управлению. В этом случае отображение значения положения МР позволяло ЧО с достаточной точностью остановить робот в нужном месте. При этом временные затраты существенно сократились и в среднем составили 21,4 с (см. рис. 4).

5.2. О роли системы отражения усилий

В эксперименте по позиционированию МР систему отражения усилий применяли для передачи ЧО информации о наличии препятствий на пути робота. На рис. 5 показаны графики изменения сил, отражаемых на ЗУ. На рис. 5, *а* сила была вычислена по формуле (7), где параметр $i = 0$, на рис. 5, *б* — по формуле (7), где параметр $i = 1$, что означает, что сила дополнительно содержала информацию о скорости МР. В первом случае (см. рис. 5, *а*) наблюдались колебания положения МР при позиционировании, вызванные наличием препятствия вблизи МР. Во втором случае (см. рис. 5, *б*) колебания положения МР не были ярко выраженными благодаря силовому отражению информации о скорости МР. Дополнительное отображение информации о скорости МР с использованием системы отражения усилий повышает устойчивость системы ДУ МР при позиционировании в скоростном режиме управления. В результате точность ДУ повысилась, средняя ошибка позиционирования составила 0,2616 м (см. рис. 6).

Критичным было использование системы отражения усилий при позиционном режиме ДУ (см. рис. 5, *в*). По мере приближения МР к желаемому положению и препятствию на ЗУ воспроизводилась сила, предупреждающая ЧО о наличии постороннего объекта на пути МР. Большое значение коэффициента масштабирования k_S (см. (4)) являлось причиной высокой чувствительности МР к небольшим изменениям положения ЗУ. Поэтому усилия, воспроизводимые на ЗУ, вызывали колебания положения МР, что существенно снижало точность системы ДУ. Например, это видно на графике, изображенном на рис. 5, *в* на 25 с движения МР. Такое же снижение точности наблюдалось при комбинированном режиме управления (см. рис. 5, *г*). Средняя ошибка в этом случае была максимальной (см. рис. 6).

5.3. Влияние режима ДУ на производительность

Было изучено влияние режимов ДУ на производительность системы. Под производительностью системы ДУ МР мы понимаем скорость выполнения поставленной задачи. Поэтому в качестве показателя производительности было выбрано время, требуемое для завершения задачи. В эксперименте, описанном в разделе 4.3, для каждого ЧО было измерено время, за которое он завершал задачу навигации МР и манипуляции над объектами. Наименьшее время понадобилось при скоростном режиме ДУ. Все участники эксперимента успешно выполнили поставленную задачу. Среднее время составило 270 с (рис. 9, *а*). Больше времени потребовалось при позиционном и комбинированном режимах управления. В позиционном режиме управления ЧО последовательно задавал желаемое положение МР с помощью ЗУ. При этом из-за ограниченности рабочей зоны ЗУ ЧО приходилось осуществлять перевод ЗУ в начальное положение и сброс СК ЗУ. Выполнение этих операций занимало значительное время, поэтому общее требуемое время было относительно большим. Тем не менее, среднее значение требуемого времени в комбинированном режиме ДУ было меньше, чем в позиционном управлении (рис. 9, *а*). Это связано с тем, что в комбинированном режиме управления ЧО мог использовать управление по скорости для перемещения МР на большие расстояния (например, перемещение из комнаты 1 в комнату 2), что значительно ускоряло выполнение задачи. Для более точного управления МР ЧО мог переключиться к позиционному управлению.

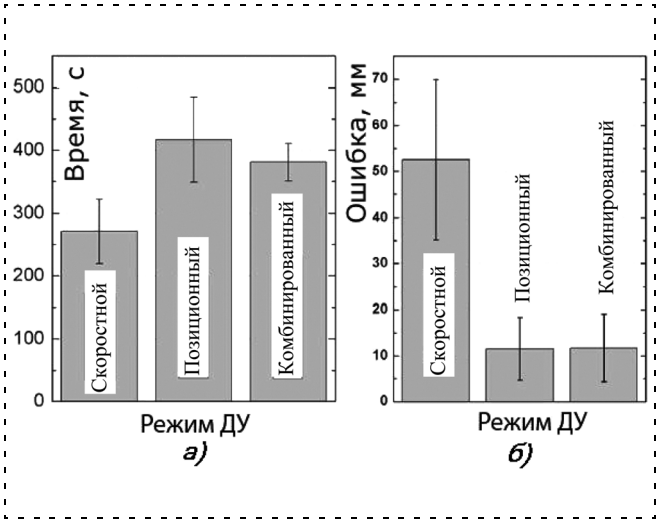


Рис. 9. Средние значения времени, требуемого для выполнения задачи (*а*); средние значения ошибки (*б*)

5.4. Влияние режима ДУ на точность

Кроме того, в эксперименте, описанном в разделе 4.3, для каждого ЧО была измерена точность позиционирования объектов 1 и 2. Максимальная ошибка возникала при скоростном режиме. Средняя ошибка для всех участников эксперимента превысила 50 мм (рис. 9, *б*). Существенно бóльшая точность была достигнута при позиционном и комбинированном режимах ДУ. При позиционном управлении приращение положения ЗУ непосредственно соответствовало изменению положения МР. Таким образом, ЧО мог легко управлять положением МР,

что позволило добиться относительно высокой точности. То же самое можно сказать и о комбинированном режиме управления, так как ЧО имел возможность переключаться от скоростного режима управления к позиционному в случаях, когда было необходимо осуществлять точные манипуляции по перемещению объектов. Средняя ошибка при позиционном и комбинированном режимах управления составила 12 мм (рис. 9, *б*).

5.5. Компромисс между производительностью и точностью

По экспериментальным данным был проведен дисперсионный анализ и апостериорный тест Тьюки с критерием значимости, равным 4,51. Анализ показал существенные различия для измеренного времени и точности в экспериментах с позиционным и скоростным режимами управления и в экспериментах с комбинированным и скоростным режимами управления. Различия между измеренным временем и точностью в экспериментах с позиционным и комбинированным режимами управления статистически незначимы.

Результаты экспериментов и проведенного статистического анализа позволяют сделать следующие выводы. Применение комбинированного режима ДУ МР позволяет значительно повысить точность управления движением и в то же время понижает производительность системы. Согласно экспериментам при комбинированном режиме ошибки управления МР снизились на 400 %, в то время как временные затраты повысились на 30 %. На рис. 10 показана диаграмма, на которой одновременно отмечены результаты измерения времени и ошибки для пяти ЧО в эксперименте, описанном в разделе 4.3. На диаграмме выделены три зоны, соответствующие трем режимам управления. Очевидно, что результаты, полученные при скоростном режиме ДУ, существенно отличаются от результатов при позиционном и комбинированном режимах ДУ.

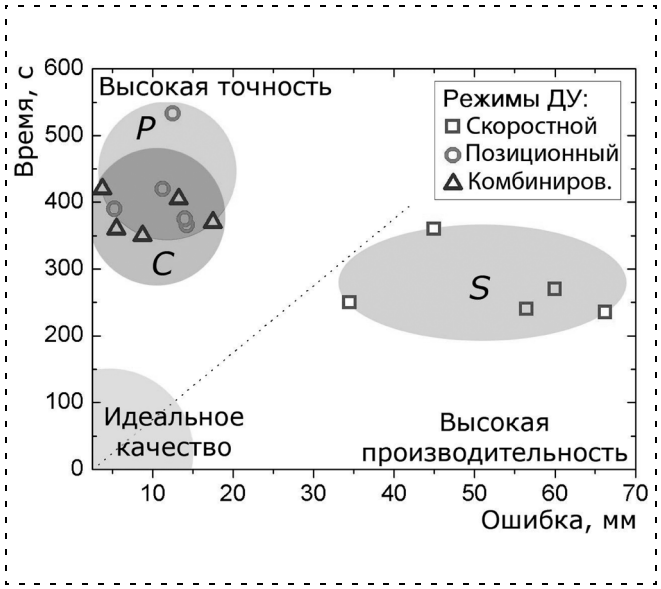


Рис. 10. Диаграмма зависимости точности управления от затраченного времени; обозначения режимов управления: *P* — позиционный, *S* — скоростной, *C* — комбинированный

Заключение

Проведено экспериментальное исследование системы ДУ МР при различных режимах управления и типах ЧМИ и проанализировано влияние режимов ДУ на точность и производительность системы. Эксперименты показали, что текстовое отображение информации удобно применять для прямого и точного управления положением МР. Системы отражения усилия делают ДУ безопасным, предотвращая возможные столкновения МР с объектами удаленной среды. Однако применение систем отражения усилий в некоторых случаях может приводить к снижению точности ДУ МР. Это особенно важно при позиционном режиме управления МР, находящемся в среде с большим числом посторонних объектов.

Традиционный для ДУ МР скоростной режим обеспечил наибольшую производительность, в то время как предложенный комбинированный режим управления позволил существенно повысить точность управления положением МР. Предложенный комбинированный режим управления может применяться для ДУ МР как в больших, так и в ограниченных удаленных пространствах, при этом обеспечивая высокую точность движения при сохранении относительно высокой скорости выполнения поставленных задач.

Список литературы

1. **Кулешов В. С., Лакота Н. А.** Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. Москва: Машиностроение, 1986.
2. **Lee S., Sukhatme G. S., Kim G. J., Park C.-M.** Haptic control of a mobile robot: a user study // Proceedings of IEEE/RSJ IROS 2002, Lausanne, Switzerland, October 2002.
3. **Diolaiti N., Melchiorri C.** Haptic teleoperation of a mobile robot // Proc. of the 7th IFAC symposium of robot control, 2003. P. 2798—2805.
4. **Nielsen C. W., Goodrich M. A., Ricks R. W.** Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation // IEEE Trans Robot. 2007; 23(5): 927—941.
5. **Farkhatdinov I., Ryu J.-H.** Hybrid position—position and position—speed command strategy for the bilateral teleoperation of a mobile robot // International Conference on Control, Automation and Systems 2007, COEX, Seoul, 17—20 October 2007.
6. **Farkhatdinov I., Ryu J.-H.** Switching of control signals in teleoperation systems: formalization and application // Proc. of the 2008 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, Xi'an, 2—5 July 2008.

CONTENTS

Teryaev E. D., Filimonov N. B. Nanomechatronics: the condition, problems, prospects 2

The modern state, urgent problems and the perspectives of nanomechatronics development, i.e. the special division of mechatronics generated by its convergence with nanotechnologies and is designed to engaged in the theory and practice of nanomechatronics systems is analyzed.

Keywords: *mechatronic, nanotechnologies, convergence of mechatronics with nanotechnologies, myths and realities of nanomechatronics.*

Filaretov V. F., Gubankov A. S. Synthesis of Adaptive Control Systems Which Are Tuned According to the Amplitude Frequency Characteristics of Objects with Variable Parameters 15

In the work the synthesis method of adaptive control systems of dynamic objects with the variable parameters is proposed. Regulators' parameters in these systems are tuned on the basis of amplitude frequency characteristics providing a maximally possible motion speed of these objects without dynamic accuracy reduction. Performed simulation of tile synthesized system confirmed the high efficiency of the proposed method.

Keywords: *adaptive control, variable parameters, amplitude frequency characteristic, operation speed, conveyer.*

Bronnikov A. M., Bukov V. N. Decentralized Adaptive Control in Multivariate System with Identification and Model Coordination 22

There are methods of synthesis an adaptive decentralized regulator with identifier and reference model for multivariate time-depended linear control system with parametric and external disturbances substantiated in the article. As opposed to known publications about decentralized control with model coordination the local MIMO systems are considered. The given tracking accuracy after local reference models with simplified objectives to identifier is provided. It is shown that accuracy of control doesn't connect directly with asymptotic accuracy of parameter estimation. The numeric example is given.

Keywords: *linear multivariate control system, identification, reference model, adaptive regulator, decentralized control.*

Terekhov V. A., Nikonov A. N. Synthesis of Neurocontroller for Nonlinear Dynamic Objects Based on One Bifurcation Model 31

Synthesis's problem of typical neural network regulator for group of nonlinear models with non-reducible to linear dynamic behavior is considered. Generalized state function of controllable system based on models from local bifurcation theory is formed. Regulator is constructed using multilayered neural networks to be learned by dynamic algorithm with generalized state function and synthesis's problem is reduced to calculation of unknown coefficients. Main results are verified by numerical simulation.

Keywords: *nonlinear dynamic, bifurcations, generalized model, macro variable.*

Nechaev Yu. I. Information Technology and Control in On-Board Intelligence Systems New Generation . .42

The questions of increase of efficiency of modeling of behavior of nonlinear dynamic object are discussed at functioning onboard intelligence system (IS) in complex dynamic environments. The basic attention is given to use of neural networks as competing computing technologies at the analysis and interpretation of the information. The statement of a task and concept of maintenance of efficiency modeling of dynamics object as essentially of nonlinear system is formulated. The model of waves representation as a climatic spectrum of complex spatial structure is developed and the scenarios of development of storm are formulated. The computer modeling of dynamics of interaction of nonlinear object is carried out at a various level external disturbance.

Keywords: *dynamic object of sea basing, onboard intellectual control systems, behaviour modelling, sea excitement, the nonlinear dynamics, the synergetics, the determined chaos, the neuronet prediction.*

Rezchikov A. F., Mityashin N. P., Kuzmichenko B. M., Ryabov O. N., Karpuk R. V. Multicriteria Choice of Equipment Based on Fuzzy Measure of Value Criteria 54

The methods of multicriteria evaluation and choice of equipment in the system of interaction criteria expressed in the fact some combination of object properties can increase their joint value compared with their values to be considered separately.

Keywords: *fuzzy measure, multi-criteria choice, robotic assembly complex, Sugeno integral, expert method of evaluation of fuzzy measure.*

Sebryakov G. G. Approximating Models of the Man-Operator Activity at the Semiautomatic Control Systems by the Dynamic Objects 59

The approach for the construction of models of the man-operator activity at the dynamic system tracking on the base of orthogonal functional nonlinear approximations is developed.

Keywords: *semiautomatic control, model of the man-operator activity, orthogonal functional approximations.*

Farkhatdinov I. G., Poduraev Yu. V., Ryu Jee-Hwan. Experimental Study of Position, Speed and Combined Position-Speed Control in the Teleoperation of Mobile Robot 70

This paper presents a user study of mobile robot teleoperation. Performance of speed, position and combined command strategies in combination with text, visual and haptic feedback information were evaluated by experiments. Two experimental tasks were designed: positioning of mobile robot and navigation in complex environment. Time for task completion and motion accuracy were measured and compared for different command strategies and types of feedback. Role of haptic, text and visual feedback information in combination with described command strategies is outlined.

Keywords: *mobile robot, teleoperation, human-robot interaction, haptic interface.*

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*
Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

Сдано в набор 03.11.2009. Подписано в печать 11.12.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,64. Заказ 21. 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