



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год
ISSN 1819-3161

УЧРЕДИТЕЛЬ

Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
Д.А. Новиков

Заместители главного
редактора
Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пашенко

Редактор
Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор
Л.В. Петракова

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru
www.ipu.ru/period/pu

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ООО «Адвансед Солюшнз»

Отпечатано
в Институте проблем управления

Подписано в печать
29.04.2009 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве
Российской Федерации
по делам печати,
телерадиовещания
и средств массовых
коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ №77-11963
от 06 марта 2002 г.

Журнал входит в Перечень ведущих
рецензируемых журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой
степени доктора и кандидата наук

Подписные индексы:
80508 и **81708** в каталоге Роспечати
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Учреждение Российской
академии наук
Институт проблем управления им.
В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.1/2009

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

СОДЕРЖАНИЕ

Семьдесят лет становления и развития отечественной науки управления:
Институту проблем управления — 70 лет 2

Теория систем управления

Поляк Б.Т. Развитие теории автоматического управления. 13

Теория управления социально-экономическими и организационными структурами

Дорофеюк А.А. Методология экспертно-классификационного анализа
в задачах управления и обработки сложноорганизованных данных
(история и перспективы развития) 19

Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем (история развития
и современное состояние). 29

Технические средства автоматики и вычислительной техники

Основные результаты исследований и разработки технических средств и систем
автоматизации 36

Системы управления технологическими процессами

Бахтадзе Н.Н., Лотоцкий В.А. Современные методы управления произ-
водственными процессами 56

Теория и методы разработки программного обеспечения систем управления

Кузнецов О.П. Интеллектуализация поддержки управляющих решений
и создание интеллектуальных систем 64

Автоматизированные системы организационного управления и обработки данных

Кульба В.В., Косяченко С.А., Лебедев В.Н. Автоматизированные инфор-
мационно-управляющие системы социально-экономических и организа-
ционных структур 73

Управление подвижными объектами

Рутковский В.Ю. Управление объектами космической и авиационной
техники. 87

Дорри М.Х. Автоматизация управления морскими подвижными объектами 94

Борисов В.Г., Данилова С.К., Чинакал В.О. Исследования по созданию
перспективных систем управления морскими подвижными объектами
и тренажерных систем 103

* * *

Contents and abstracts. 107



70 лет
ИПУ РАН

СЕМЬДЕСЯТ ЛЕТ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ УПРАВЛЕНИЯ: ИНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ – 70 ЛЕТ

В 1939 г. Совнарком СССР принимает решение об организации в составе Отделения технических наук АН СССР Института автоматики и телемеханики (на базе существовавшей с 1934 г. Комиссии по телемеханике и автоматике). Первым директором Института был назначен бывший военный лётчик, а к тому времени выдающийся учёный в области авиационной энергетики академик Виктор Сергеевич Кулебакин. Перед Институтом стояла задача развернуть фундаментальные исследования в области автоматики и управления, связав их с решением практических задач. С самого начала существования Института его деятельность связана с такими известными всему миру именами учёных, как В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин, А.А. Андронов, Б.Н. Петров, М.А. Айзерман, Я.З. Цыпкин, Б.С. Сотсков, М.А. Гаврилов, А.А. Фельдбаум и многие другие.

Ряд выдающихся учёных — теоретиков и прикладников науки об управлении — выросли или получили мировую известность в стенах Института. Наряду с этим, к работам Института всегда привлекались крупные учёные, которых интересовала новая область знаний. Они привносили в Институт собственный опыт постановки научных проблем и поиска путей их решения, способствовали созданию в Институте особой творческой атмосферы, оказывая важнейшее влияние на формирование этических принципов общения в научном коллективе. Именно выдающиеся учёные с мировыми именами оказали огромную помощь в установлении профессиональных контактов Института с международным научным сообществом. Как результат, наша страна стала одним из инициаторов создания Международной федерации по

автоматическому управлению — ИФАК и организатором I Всемирного конгресса ИФАК, который состоялся в Москве в 1960 году.

В момент создания Института в его составе было 22 сотрудника, и в том числе Б.Н. Петров (будущий академик и вице-президент АН СССР, руководивший Институтом позднее, в 1947—1951 гг.), М.А. Гаврилов (будущий член-корреспондент АН СССР), Н.Н. Шумиловский (будущий академик Киргизской академии наук), профессора В.А. Лоссиевский, Г.В. Щипанов и др. Вскоре в штат Института был принят выдающийся математик академик Н.Н. Лузин, который — как впоследствии и академик А.А. Андронов — стал воспитателем целой плеяды блестящих учёных-теоретиков в области управления.

Предвоенные годы жизни Института отмечены значительными продвижениями в области описания систем управления с помощью дифференциальных уравнений и дискуссией по «условиям компенсации» Г.В. Щипанова, при выполнении которых, как утверждал их автор, система автоматического регулирования перестаёт реагировать на приложенные к ней внешние возмущения. Эта дискуссия велась на страницах не только научных изданий, но и центральной партийной прессы. Фактически, условия Щипанова были предтечей того, что впоследствии стало теорией инвариантности, развитой В.С. Кулебакиным, Н.Н. Лузиным и Б.Н. Петровым. Г.В. Щипанов умер в 1953 г., а его научная «реабилитация» состоялась в 1960 г., когда комиссия в составе академиков А.А. Дородницына, А.Ю. Ишлинского и Б.Н. Петрова подтвердила научную значимость его открытия (формально «условия компенсации Г.В. Щипанова» были



признаны открытием в 1966 г. с приоритетом от апреля 1939 г.).

В годы войны Институт работает на интересы фронта, армии, а ряд его будущих научных корифеев (М.А. Айзерман, П.П. Пархоменко, Я.З. Цыпкин и др.) с оружием в руках защищают Родину. Среди важнейших результатов исследований ученых-инженеров, направленных на повышение боеспособности Советской Армии во время Великой Отечественной войны, нельзя не отметить работы по борьбе с неконтактным минно-торпедным оружием, проводившиеся под руководством будущего члена-корреспондента АН СССР Б.С. Сотскова, и работы по автоматизации контроля качества при производстве патронных гильз крупного калибра, которые велись тогда молодым инженером Б.Н. Петровым под руководством будущего академика В.А. Трапезникова, возглавлявшего Институт в 1951—1987 гг. Группа под руководством М.А. Гаврилова занималась на военном заводе наладкой релейной аппаратуры и разрабатывала способы борьбы с помехами в системах управления подвижными объектами.

После войны в Институт приходит академик А.А. Андронов и организует знаменитый Андроновский семинар, через который проходит почти всё послевоенное поколение научных лидеров Института автоматики и телемеханики (М.А. Айзерман, А.Я. Лернер, М.В. Мееров, В.В. Петров, В.В. Солодовников, Я.З. Цыпкин, А.А. Фельдбаум и многие другие). В 1969 г. Президиум Академии наук СССР учредил премию им. А.А. Андропова, одними из первых лауреатов которой стали А.Г. Бутковский и ученик Андропова М.В. Мееров.

Наиболее выдающимися достижениями Института в 1940 — 1950-е гг. становятся:

- разработка математического аппарата алгебры логики для описания, анализа и синтеза релейно-контактных схем (М.А. Гаврилов);
- разработка общей теории линейных систем регулирования (В.С. Кулебакин, Б.Н. Петров, В.В. Солодовников, Я.З. Цыпкин, М.А. Айзерман, М.В. Мееров и др.);
- развитие теории нелинейных систем управления, в том числе метода точечных преобразований, теории абсолютной устойчивости и теории релейных систем (В.В. Петров, Г.М. Уланов, А.А. Фельдбаум, М.А. Айзерман, Я.З. Цыпкин);
- теория аналитического конструирования регуляторов (А.М. Лётов);
- разработка общих методов исследования дискретных систем автоматического регулирования (Я.З. Цыпкин);
- разработка основ теории оптимального управления (А.А. Фельдбаум, А.Я. Лернер и, впоследствии, А.Г. Бутковский, В.Ф. Кротов);

- разработка теории дуального управления (А.А. Фельдбаум);

- создание первой отечественной серии аналоговых вычислительных машин (Б.Я. Коган, В.А. Трапезников и др.);

- создание принципиально новых чувствительных элементов, датчиков и приборов (Б.С. Сотсков, Д.И. Агейкин, М.А. Розенблат, Е.К. Круг и др.).

В начале 1950-х гг. по просьбе С.П. Королева и В.П. Глушко в Институте были начаты работы по управлению жидкостными ракетными двигателями для первой в мире межконтинентальной ракеты Р-7. Руководил работами Б.Н. Петров. Уже к 1953 г. были получены первые результаты по решению задачи управления расходом топлива, проектированию системы опорожнения баков, системы регулирования кажущейся скорости, рассмотрены возможные типы исполнительных механизмов в системах управления ракетой (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, В.В. Петров, Г.М. Уланов, С.В. Емельянов, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова и др.). В дальнейшем эти результаты были развиты и предложены принципы построения и теория систем управления жидкостными ракетными двигателями (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Н. Чацкий, В.Н. Марков и др.).

В связи с разработкой систем регулирования опорожнения баков и синхронизации расхода топлива была создана теория бортовых терминальных систем управления (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов и др.).

В 1980-е гг. была завершена разработка общей концепции совершенствования энергетических характеристик ракет-носителей средствами управления (Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов и др.).

Системы управления, созданные на основе выполненных Институтом работ, являются в настоящее время составной частью всех крупных жидкостных ракет разработки главных конструкторов С.П. Королева, М.К. Янгеля, В.Н. Челомея, В.Ф. Уткина.

Начиная с середины 1950-х гг., в Институте начала развиваться теория управления деформируемыми космическими аппаратами (спутники с большими панелями солнечных батарей, с выносными радиоантеннами и др.). Были предложены модально-физическая форма математической модели, амплитудный и фазовый принципы демпфирования упругих колебаний конструкций объекта, метод фазовой биплоскости для синтеза алгоритмов управления (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов).

В последние годы решена проблема совместного оценивания координат «жесткого» и упругого движений деформируемого космического аппарата (В.А. Суханов, Т.В. Ермилова, А.С. Ермилов и др.). Предложены алгоритмы управления, использующие элементы интеллектуальной диагностики со-





стояния упругого объекта, алгоритмы адаптации с использованием нечеткой логики (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, И.Н. Крутова, В.М. Глумов и др.).

В конце 1950-х гг. были начаты работы по теории адаптивных систем с моделью (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков, Б.В. Павлов, И.Б. Ядыкин и др.). Были предложены принципы построения таких систем, линеаризованные модели систем, «ляпуновские» алгоритмы адаптации, введено понятие «обобщенного» объекта и синтез его структуры на основе теории инвариантности.

В дальнейшем полученные результаты были обобщены и на их основе разработаны теория адаптивного координатно-параметрического управления, теория настраиваемой работоспособности, концепция восстанавливаемой функциональной работоспособности и настраиваемой стратегии управления, развивается теория оптимальных адаптивных регуляторов. На основе теории адаптивного координатно-параметрического управления впервые в СССР были разработаны адаптивные системы управления рядом важнейших типов летательных аппаратов.

В 1980 г. Академия наук СССР учредила Золотую медаль им. Б.Н. Петрова (с 1993 г. — Премия им. Б.Н. Петрова). Первую золотую медаль им. Б.Н. Петрова в 1983 г. получил В.Ю. Рутковский. В 2004 г. премии им. Б.Н. Петрова удостоены Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко и В.П. Иванов, в 2007 г. — В.В. Кульба, Б.В. Павлов и чл.-корр. РАН Е.А. Микрин (РКК «Энергия»).

Будущий академик Я.З. Цыпкин развил общую теорию адаптивных систем, которая стала естественным продолжением теории дуального управления А.А. Фельдбаума и впоследствии дала начало теории робастных систем, основы которой были заложены Я.З. Цыпкиным и развиваемой сегодня в лаборатории им. Я.З. Цыпкина под руководством Б.Т. Поляка. Дело в том, что в классической теории обычно предполагается, что модель системы известна или оценивается в процессе идентификации. Между тем, в реальных задачах все характеристики объекта содержат неизбежные неточности. Робастная теория, вызывающая огромный интерес исследователей во всём мире, предлагает методы учёта подобных неопределённостей. Если в первые годы работы в центре внимания находились проблемы анализа (робастная устойчивость), то теперь изучаются и важные проблемы синтеза (робастное управление). Для решения трудных задач робастного управления оказались полезными понятие сверхустойчивости (достаточное условие устойчивости, формулируемое в терминах линейных условий на элементы системной матрицы), вероятностный подход, численные методы. Очень удобным аппаратом, приспособленным к реше-

нию современных задач анализа и синтеза робастных систем, явилась классическая теория D-разбиения, развитая на новом уровне в работах сотрудников лаборатории.

Академиком В.С. Пугачёвым и его учениками была создана общая теория управления стохастическими системами. Это связано с тем, что по мере развития теории автоматического управления был постепенно осознан тот факт, что классические методы этой теории недостаточны для расчета сложных автоматических систем, работающих в условиях случайных воздействий. Естественным шагом в развитии теории систем и процессов управления стало привлечение вероятностных методов, позволяющих учитывать влияние различного рода случайных возмущений и помех на работу автоматических систем и их элементов. В результате в рамках общей теории процессов управления оформилось важное направление — стохастическая теория процессов управления, широко использующая методы теории вероятностей и математической статистики. Работы Института в области стохастических проблем управления дали мощный толчок ее интенсивному развитию, существенно обогатили ее и привели к появлению и развитию новых разделов.

Важным направлением исследований в Институте стала теория статистически оптимальных систем, в рамках которой были разработаны методы синтеза оптимальных нестационарных и нелинейных систем (В.С. Пугачев, Л.П. Сысоев), новые эффективные методы нелинейной фильтрации и экстраполяции случайных процессов (Р.Ш. Липцер, А.Н. Ширяев, В.С. Пугачев), методы статистической оптимизации по различным критериям качества (Н.И. Андреев). В Институте были разработаны эффективные приближенные методы расчета и анализа точности многомерных нелинейных систем, подвергающихся случайным воздействиям (М.Л. Дашевский, Р.Ш. Липцер). Была создана статистическая теория обучения и самообучения автоматических систем, функционирующих в условиях неполной информации (В.С. Пугачев), заложены основы общей теории стохастических систем (В.С. Пугачев, И.Н. Сеницын). Для последнего периода развития стохастической теории управления характерен большой интерес к синтезу автоматических систем в условиях параметрической и непараметрической неопределенности. Были разработаны основы теории устойчивого непараметрического оценивания функционалов от неизвестных распределений и на ее основе создана теория непараметрического оценивания случайных процессов с неизвестными вероятностными характеристиками (А.В. Добровидов, Г.М. Кошкин, В.А. Васильев).

Один из учеников В.С. Пугачёва, Н.С. Райбман, приложил немалые усилия, чтобы методы



построения математических моделей объектов управления по экспериментальным статистическим данным и теория идентификации стали эффективными инструментами разработчиков систем управления различными народно-хозяйственными объектами (С.А. Власов, В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель, В.М. Чадеев).

Работы по стохастическому робастному управлению для линейных дискретных стационарных систем были начаты в Институте в 1992 г. как развитие идей H_∞ -теории управления, активно обсуждавшихся в период 1991—1992 гг. на семинаре под руководством А.С. Позняка. В соавторстве с И.Г. Владимировым (ИППИ РАН) и А.В. Семеновым (ГосНИИАС) А.П. Курдюковым была создана теория построения стохастических систем управления, робастных относительно характеристик случайного входного возмущения.

Построенная теория была названа авторами анизотропией теории управления (анизотропия — термин, характеризующий неоднородность свойств по направлениям), так как в основе этой теории лежит понятие анизотропии сигнала. Анизотропией сигнала является характеристика отклонения вероятностного распределения многомерного входного сигнала от многомерного сигнала, распределенного по нормальному закону с нулевым средним и скалярной ковариационной матрицей, в некотором смысле являющегося изотропным. Анизотропная теория управления занимает промежуточное место между теорией построения линейно-квадратичных гауссовских регуляторов и H_∞ -теорией управления. Более того, обе эти теории являются частными случаями анизотропной теории и получаются при стремлении анизотропии, соответственно, к нулю и к бесконечности.

Анизотропная теория сочетает преимущества упомянутых выше теорий, позволяет строить регуляторы, менее консервативные, чем H_∞ -регуляторы, и более робастные, чем квадратично-квадратично гауссовские регуляторы. Построенная теория показала свою состоятельность в приложении к построению регуляторов для посадки самолета в условиях неконтролируемых возмущений.

В 1957 г. будущий академик С.В. Емельянов впервые в мировой практике предложил использовать неустойчивые движения и неустойчивые структуры для улучшения качества переходных процессов в системах автоматического управления. В 1960-х гг. С.В. Емельяновым и его школой эта идея была развита, в результате чего была создана теория систем с переменной структурой. В классе систем с переменной структурой эффективно решались актуальные задачи теории управления, в том числе: стабилизация существенно неопределенных систем; построение системы слежения, обладающей высоким порядком астатизма; фильтра-

ция и дифференцирование при неизвестной интенсивности шума и др.

С начала 1960-х гг. по инициативе А.А. Фельдбаума и М.А. Айзермана в Институте начались интенсивные исследования по теории распознавания образов, автоматической классификации, самообучающимся системам, методам обработки сложноорганизованных данных. Здесь необходимо отметить фундаментальные работы, проводившиеся в ряде лабораторий: Я.З. Цыпкина и Г.К. Кельманса; М.А. Айзермана, Э.М. Бравермана, Л.И. Розоноэра и Б.М. Литвакова; В.Н. Вапника и А.Я. Червоненкиса; А.А. Дорофеюка, И.Б. Мучника и Е.В. Баумана.

Институт является пионером и основоположником признанного во всем мире широкого научного направления — «Оптимальное управление системами с распределенными параметрами (СРП)» (А.Г. Бутковский). Только перечисление важных научных, технических и технологических приложений этой дисциплины, в которых участвовал Институт, займет довольно много места: это металлургия, химия, машиностроение, космические объекты, экономика и др.

В теоретическом отношении проблемы оптимального управления СРП связаны с дифференциальными уравнениями с частными производными и с запаздыванием, интегральными и интегро-дифференциальными уравнениями, функциональными уравнениями и рядом других математических дисциплин, например, таких как теория чисел, фракталы и др. С физической точки зрения эти проблемы связаны с управлением полями и сплошными средами различной, в том числе, неклассической природы.

Сейчас в мире насчитывается много тысяч публикаций, посвященных этому научному и прикладному направлению. В Институте на эту тему написано более десяти монографий. Восемь из них переизданы в США, Великобритании, Голландии, Финляндии. Нужно отметить монографию «Управление квантово-механическими системами», написанную в Институте в 1984 г. на основе статей от 1979 г., которая переиздана на Западе и признана в мире как пионерская в этой области. Эта проблема представляется сейчас как ключевая в области современных нанотехнологий.

Математическая специфика направления исследований Института под руководством В.Ф. Кротова сводится к формулировке условий глобальной оптимальности управления динамическими системами и созданию основанного на них аппарата решения соответствующих задач. Всё начиналось с создания и изучения этого аппарата для детерминированных динамических систем, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями. Затем полученные первоначально результаты были обобщены, с одной сто-





роны, «вглубь» — в направлении их смыкания с необходимыми условиями минимума функционалов вариационного исчисления и теории оптимального управления — вплоть до получения единых необходимых и достаточных условий, а с другой — «вширь» и распространены на новые классы задач с распределёнными параметрами, с неполной информацией и т. д.

Уравнения теории оптимального управления крайне сложны, и их решение сопряжено со многими вычислительными проблемами, составляющими предмет прикладной части теории оптимального управления — вычислительных методов синтеза допустимого и оптимального управлений. Были разработаны новые эффективные универсальные методы последовательного улучшения управления, опирающиеся на указанные идеи и подкреплённые вычислительным опытом и соответствующими программными средствами.

Это направление математической теории оптимального управления разрабатывается в сотрудничестве с рядом научных коллективов РАН и университетов России, стран СНГ и дальнего зарубежья (Германия, США, Израиль и др.). В комплексе выполняемых исследований в рамках этого интересующего весь мир научного направления Институт играет ведущую роль. Интерес к этим работам отражён в многочисленных монографиях, учебниках, обзорах и статьях, в которых развиваются и излагаются соответствующие результаты. Подробный анализ результатов исследований по данному направлению и его приложениям содержится в монографии В.Ф. Кротова «Global Methods in Optimal Control Theory», Marcel Dekker Inc., 1996, New-York, Basel.

Полученные математические результаты применялись для исследования следующих прикладных научно-технических проблем:

- (1) оптимизация траекторий движущихся объектов, анализ и синтез их систем управления;
- (2) моделирование и анализ развития многоотраслевой экономики;
- (3) синтез и оптимизация управления квантовым состоянием вещества.

Из проблем класса (1) выделим задачи оптимального управления манёврами летательного аппарата в атмосфере Земли при помощи программного изменения тяги двигателя и угла атаки. Расчёты этих манёвров постоянно воспроизводятся в инженерной практике применительно к различным классам летательных аппаратов — от космических аппаратов до самолётов. Имеется большое число публикаций по решению этих задач с помощью уравнений принципа максимума и других способов локальной оптимизации. Предлагаемые подходы отличаются от других известных в литературе тем, что решают проблему отыскания абсолютного оптимума, а также продвинутоостью ана-

литической части решения, алгоритмической простотой и, в частности, отсутствием краевых задач.

В рамках прикладного направления (2) проведены исследования нелинейных оптимизационных моделей развития многоотраслевой экономики.

Особый интерес представляет прикладное направление (3). В настоящее время существует обширная и бурно развивающаяся область новых физических технологий, базирующихся на управлении квантовым состоянием вещества путём воздействия на него электромагнитного поля. Среди них — синтез новых материалов при помощи физических средств (вместо химических), разделение изотопов, фотохимия и др. Математический алгоритм синтеза подобного управления является важнейшей частью проектирования этих нанотехнологий.

По общему мнению физиков, адекватным аппаратом для осуществления подобного синтеза являются методы теории оптимального управления. Соответствующие задачи описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений, имеющими порядки в несколько тысяч. Были проведены исследования решений таких задач с помощью разработанных под руководством В.Ф. Кротова методов последовательного улучшения. Публикация этих методов породила в 1990-е гг. волну исследований специалистов-физиков и соответствующих публикаций в ведущих мировых физических и физико-химических журналах. Во всех этих публикациях делался вывод о том, что методы, разработанные в Институте, являются наилучшим способом решения соответствующих задач. Последняя такая статья опубликована в 2008 г. в журнале «Physical Review».

В конце 1960-х гг., под руководством М.В. Мерова в Институте были начаты фундаментальные исследования, связанные с проблемами построения оптимальных многосвязных систем управления (будущий академик О.И. Ларичев, В.Н. Кулибанов, Я.М. Бершанский, Р.Т. Янушевский), в частности, с использованием условий А.А. Милютин и А.Я. Дубовицкого, принципов оптимальности Р. Беллмана и принципа максимума Л.С. Понтрягина. Полученные результаты послужили основой для разработки методов и алгоритмов построения систем оптимального динамического управления гидродинамическими процессами фильтрации при разработке нефтяных месторождений.

В 2000-е гг. были начаты фундаментальные исследования проблем моделирования и управления нелинейными динамическими многосвязными системами большой размерности (А.В. Ахметзянов, В.Н. Кулибанов). В результате были получены результаты, подтверждающие необходимость разработки новых принципов моделирования и оптимального управления процессами, учитывающих



структурные и физические особенности пространства состояний, свойства движущихся субстанций, характер допустимых управляющих воздействий.

Огромную роль в формировании у коллектива сотрудников Института вкуса к решению сложных и комплексных проблем управления важнейшими народно-хозяйственными объектами сыграли работы по Проекту 705 — созданию первой в мире комплексно автоматизированной атомной подводной лодки (АПЛ). Все работы по новой АПЛ возглавил академик А.П. Александров, по автоматизации — академик В.А. Трапезников. Впоследствии эти работы нашли продолжение при создании и совершенствовании систем управления атомными ледоколами («Арктика», «Сибирь»), а также новой серии крупнотоннажных танкеров и контейнеровозов и на порядок изменили представления моряков о требованиях к надёжности комплектующих элементов. В процессе реализации Проекта 705 было понято, что важнейшую роль в повышении эффективности решения боевых задач, особенно в экстремальных ситуациях, играет человеческий фактор (в то время до 70 % аварийных ситуаций возникали по вине человека-оператора). Была создана специальная группа во главе с Д.И. Агейкиным, разработки которой, в том числе полнатурных стендов-тренажёров, методик профессионального отбора операторов, выбора технических средств визуализации и характера представления информации, позволили на порядок поднять эффективность и надёжность работы человека-оператора и групп операторов (боевых расчётов) при одновременном резком (втрое) сокращении численности личного состава АПЛ. И ещё многие другие идеи, программы и целые направления были разработаны впервые, а некоторые из них не потеряли актуальности и активно используются до сих пор.

Другой пример комплексной работы такого рода — Проект «Запчасть», направленный на решение проблемы обеспечения народного хозяйства СССР запасными частями к разнообразной технике и оборудованию, в том числе двойного назначения. Работа выполнялась группой сотрудников Института под руководством А.А. Дорофеюка в 1971—1975 гг. Огромную роль в её успешном выполнении сыграл В.А. Трапезников, который как первый заместитель Председателя ГКНТ сумел привлечь внимание к этой работе А.Н. Косыгина, Д.С. Полянского (в то время первый зам. Председателя Совета министров СССР), первых руководителей нескольких союзных республик и крупных регионов РСФСР.

В 1960-е гг. начались и продолжают и поныне работы в области создания автоматизированных информационно-управляющих систем (А.Ф. Волков, А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, А.Д. Цвиркун, О.И. Авен, В.Л. Эпштейн и др.). Первыми приме-

рами таких систем стали АСУ «Металл» (автоматизированная система управления поставками металлопродукции в стране), АСУ «Морфлот», АСУ «Обмен» и др.

Огромную роль в автоматизации процессов массового обслуживания сыграла разработанная для Аэрофлота в конце 1960-х—начале 1970-х гг. АСУ «Сирена» бронирования мест и продажи билетов (Генеральным конструктором «Сирены» решением Совета Министров СССР был назначен В.А. Жожикашвили). Немалую роль во внедрении разрабатывавшихся методов автоматизации сыграл В.А. Кучерук.

В середине 1980-х гг. было положено начало работам по исследованию вопросов управления безопасностью сложных систем (В.В. Кульба, А.Я. Андриенко, В.Н. Бурков, Б.Г. Волик, В.Г. Лебедев, Ю.С. Легович и др.). Работы эти продолжают и поныне. Из полученных результатов наиболее серьезные связаны с решением проблем информационной безопасности и управлением безопасностью в условиях чрезвычайных ситуаций.

Хорошо известны фундаментальные достижения Института и в области теории надёжности (Б.С. Сотсков, Б.Г. Волик, С.М. Доманицкий, И.Е. Декабрун, Б.П. Петрухин) и технической диагностики (П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян, М.Ф. Каравай и др.).

Широким фронтом велись и продолжают сегодня разработки новых технических средств и систем автоматизации, активным участником которых был академик Академии наук Грузии И.В. Прангишвили, возглавлявший Институт в 1987—2006 гг. В начале 1960-х гг. в микроэлектронике была выдвинута концепция однородных микроэлектронных логических и вычислительных структур. Концепция создавалась под руководством И.В. Прангишвили. На базе этой концепции в Институте были разработаны многопроцессорные вычислительные системы серии ПС (ПС-2000 и ПС-3000). По производительности комплексы ПС были соизмеримы с самыми мощными отечественными вычислительными системами соответствующих классов. Эти комплексы обладали наилучшими значениями соотношения производительность/стоимость.

Выдвинутая ещё в 1950-е гг. Б.С. Сотсковым идея унификации средств автоматизации технологических процессов с помощью блочно-модульного принципа их построения легла в основу агрегатной унифицированной системы приборов. В последующие годы развитием этой идеи стали Государственные системы промышленных приборов и средств автоматизации ГСП-1 (1960—1970-е гг.) и ГСП-2 (1980—1990-е гг.).

Огромные продвижения были достигнуты в части создания новых принципов построения датчиков и измерительных приборов (Д.И. Агейкин,





В.Ю. Кнеллер и др.), магнитных и полупроводниковых элементов (М.А. Розенблат, Н.П. Васильева и др.), средств автоматического анализа (система БАРС) и релейных устройств (М.А. Гаврилов, П.П. Пархоменко и др.), элементов пневмоавтоматики (М.А. Айзерман, А.А. Таль, А.А. Тагаевская, Т.К. Берендс и Т.К. Ефремова). Сегодня многие из этих работ находят свои продолжения в форме создания: современных магнитных элементов с применением нанотехнологий (С.И. Касаткин), средств струйной техники (А.М. Касимов), радиоволновых датчиков (Б.В. Лункин).

Под руководством А.М. Касимова разработана агрегатно-интегральная струйная техника (АИСТ), предназначенная для управления параметрами авиационных двигателей на воздухе от воздушной турбины с температурой до 500 °С (в отдельных случаях до 950 °С) при вибрациях, ударах и широком спектре источников радиации. На основе разработок Института ОАО «Омское МКБ» и Московское ОАО «ЭГА» выпускают струйные регуляторы направляющего аппарата, компрессора и др. (более 20 регуляторов), которые эксплуатируются на самолетах ЯК-42, ИЛ-86, ИЛ-96, «Руслан», АН-70, Ту-204 и др. За последние 20 лет струйные регуляторы наработали в полете без отказов более 20 млн. ч.

В лаборатории волновых методов и средств получения информации под руководством Б.В. Лункина разрабатываются теория построения радиоволновых датчиков и ее приложения для решения задач измерения параметров и распознавания состояния объектов контроля и управления. Датчик включает в себя электродинамическую систему, служащую чувствительным элементом, и электронные средства формирования и преобразования первичной информации. Структура чувствительного элемента определяется контролируемым объектом, измеряемой величиной, условиями окружающей среды. Разработаны принципы построения датчиков различных параметров, созданы основы теории инвариантных измерений и теории построения датчиков запасов топлив в условиях невесомости, которые, в частности, нашли при непосредственном участии лаборатории применение в серийном освоении ряда информационно-измерительных систем для ракетно-космических комплексов.

В 1970-е гг. были созданы новые поколения средств аналого-цифровой техники — гибридные вычислительные системы ГВС-100 и ГВС «Русалка» (Б.Я. Коган).

Ещё одним достижением Института стала система средств программируемой автоматики с параллельной структурой (СПА-ПС), разработанная в связи с делегированием в 1986 г. Институту научного руководства программой работ по созданию АСУТП для АЭС будущего. Авторами концепции

СПА-ПС стали ученики М.А. Гаврилова (А.А. Амбарцумян и др.). Еще один проект, осуществлённый учениками М.А. Гаврилова (О.П. Кузнецов, А.К. Григорян и др.) и основанный на разработанной ими концепции языков программирования логических устройств, завершился созданием системы автоматизации программирования станков с ЧПУ, серийно выпускавшейся промышленностью в 1980-е гг.

Работы Института по исследованию свойств полупроводниковых структур со специфическими вольтамперными характеристиками (В.Д. Зотов) привели к созданию принципиально новых полупроводниковых многофункциональных сенсоров (Z-сенсоров).

Начиная с 1970-х гг., важным направлением стало исследование роли и участия человека в контуре управления и в работе по анализу и совершенствованию административных и социально-экономических систем. Здесь следует отметить пионерские работы Д.И. Агейкина и нынешние А.Д. Цвиркуна и В.К. Акинфиева, Ф.Ф. Пашенко, В.Б. Гусева, В.В. Павельева, А.С. Манделя, Э.А. Трахтенгерца и В.Г. Лебедева, А.А. Дорофеюка и А.Л. Чернявского, В.Н. Буркова, Д.А. Новикова и А.Г. Чхартишвили.

Сюда же примыкают работы по теории выбора — М.А. Айзермана, А.В. Малишевского и Ф.Т. Алескерова — и методам поддержки принятия управленческих решений — А.С. Манделя; А.А. Дорофеюка и А.Л. Чернявского; В.Н. Буркова, А.В. Щепкина и А.Ю. Заложнева.

Существенные результаты получены в области управления в задачах биологии, медицины и здравоохранения. С 1960-х гг. этими проблемами начали заниматься в лабораториях М.А. Айзермана, Н.В. Позина, А.М. Петровского и А.А. Фельдбаума. Затем фронт работ расширился. В настоящее время задачами, связанными с исследованием различных аспектов управления в биомедицинских системах, активно занимается ряд лабораторий Института. Интересные результаты в разные годы получены: А.А. Десовой; группой сотрудников под руководством Е.А. Андреевой и О.Е. Хуторской; В.Н. Новосельцевым, А.И. Яшиным и А.И. Михальским, А.А. Дорофеюком, И.Б. Мучником и С.М. Бородкиным.

С середины 1990-х гг. под руководством В.А. Уткина ведутся исследования по декомпозиционному синтезу систем управления в рамках блочного подхода. Данный подход, опирающийся на структурные свойства оператора объекта управления, является конструктивной методологической основой для анализа и синтеза систем управления линейными и нелинейными многомерными многоканальными объектами автоматического управления, функционирующими в условиях действия внешних неконтролируемых возмущений, пара-





метрической неопределенности и при неполных измерениях. К настоящему времени разработаны декомпозиционные алгоритмы синтеза обратной связи для решения ряда фундаментальных задач теории управления (стабилизации, инвариантности, наблюдения, идентификации в реальном времени, слежения и их комплексе), которые позволяют разделить задачи синтеза большой размерности на независимо решаемые элементарные подзадачи меньшей размерности. Дополнительное применение методов теории систем с разрывными управлениями, функционирующими в скользящем режиме, как в задачах управления, так и в задачах наблюдения, позволяет обеспечить робастные свойства и инвариантность замкнутых систем. Предлагаемые алгоритмы, достаточно простые в реализации, позволяют снизить объем априорной информации об объекте управления и среде его функционирования. Разработанные в теории методы и алгоритмы для общего вида математических моделей динамических систем применяются для решения ряда прикладных задач, в которых объектами управления являются роботы-манипуляторы, двигатели внутреннего сгорания, электроприводы различных типов и различные технические процессы.

В конце 2006 г., после кончины Ивери Варламовича Прангишвили, директором Института избран академик Станислав Николаевич Васильев. Институт развивается, активизировав фундаментальные исследования в различных областях теории управления и её приложений, в том числе по его основным направлениям научной деятельности, утверждённым Президиумом Российской академии наук 18 марта 2008 г.:

- теория систем и общая теория управления;
- методы управления сложными техническими и человеко-машинными системами;
- теория управления в междисциплинарных моделях организационных, социальных, экономических, медико-биологических и экологических систем;
- научные основы технологий управления подвижными объектами и навигации;
- теория и методы разработки программно-аппаратных и технических средств управления и сложных информационно-управляющих систем;
- научные основы интегрированных систем управления и автоматизации технологических процессов и управления производством.

Под руководством Б.Т. Поляка продолжает развиваться теория линейных систем автоматического управления. Здесь в центре внимания находятся такие трудные и актуальные задачи, как синтез регуляторов заданной структуры (в частности, регуляторов низкого порядка), синтез статических регуляторов по выходу, проблема одновременной стабилизации, задачи управления при постоянно

действующих возмущениях. Удалось разработать несколько эффективных подходов к их решению. Во-первых, на основе понятия сверхустойчивости можно получать решения упомянутых трудных задач с помощью линейного программирования. Во-вторых, предложен вероятностный подход к решению данных детерминированных задач. Рандомизированные алгоритмы оказались очень эффективными для многих задач управления и оптимизации.

Под руководством В.Ф. Кротова ведутся исследования по теории оптимальных систем управления и, в частности, развиваются методы вариационного исчисления и теории оптимального управления, разрабатываются алгоритмы синтеза и оптимизации управления с применением к объектам самой различной природы — техническим, физическим, экономическим.

Из актуальных теоретических и прикладных направлений, интенсивно разрабатываемых сейчас в Институте, следует отметить также единую геометрическую теорию управления, теорию неклассических фрактальных управлений, существенно расширяющую класс конкретных приложений, теорию подвижного управления, породившую широкий класс приложений и вместе с этим целый класс новых трудных математических и вычислительных задач, например, нелинейную проблему моментов (А.Г. Бутковский).

В настоящее время в Институте проводятся фундаментальные исследования, связанные с разработкой принципов иерархической многоуровневой декомпозиции и расщепления нелинейных операторов в функциональных пространствах с распараллеливанием вычислений на многопроцессорных вычислительных системах в различных программных средах (А.В. Ахметзянов). Результаты исследований ориентированы на создание универсальных принципов моделирования и оптимального управления нелинейными многосвязными системами большой размерности, в частности, процессами фильтрации флюидов (жидких и газообразных углеводородов) в пористых средах резервуаров месторождений углеводородов с геологическими и геометрическими условиями залегания любой сложности. При этом вытесняющие реагенты выступают в роли управляющих воздействий.

Анизотропийная теория распространена на системы с параметрическими возмущениями (А.П. Курдюков). Процедура синтеза анизотропийных регуляторов требует решения системы уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и алгебраического уравнения специального вида, для чего была разработана процедура решения такого рода уравнений методом гомотопий и создан пакет прикладных программ. В настоящее время ведутся работы по построению теории субоптимального анизотропийного управления, анизотропийной





теории управления для алгебро-разностных систем, проводятся исследования по построению анизотропных регуляторов пониженного порядка.

Ведутся фундаментальные исследования решения NP-трудных проблем дискретной и комбинаторной оптимизации (А.А. Лазарев). Полученные результаты применяются для решения практических задач теории расписаний и календарного планирования. Для минимаксных задач теории расписаний впервые введена метрика, и для решения этих задач применяются методы изменения параметров, динамического программирования и другие современные методы исследования. В настоящее время ведутся работы по изучению природы сложности классических комбинаторных проблем и разрабатываются алгоритмы решения практических задач большой размерности за приемлемое время с гарантированной погрешностью целевой функции. Установлены тесные научные связи с ведущими научными школами из Германии, Франции, Великобритании.

Проводятся исследования по изучению математических моделей инфраструктурных систем управления. Предложены новые принципы построения систем автоматического регулирования частоты и мощности для крупных энергообъединений, базирующиеся на применении новых высокоточных устройств измерения с привязкой к астрономическому времени и новых методов синтеза регуляторов на основе решения оптимизационных задач с ограничениями (И.Б. Ядыкин).

Под руководством члена-корреспондента РАН Д.А. Новикова активно развиваются теоретические основы разработки и исследования теоретико-игровых и оптимизационных моделей управления системами междисциплинарной природы (организационно-технической, социально-экономической, эколого-экономической и др.). Предложены оригинальные методы анализа, синтеза и оптимизации управления иерархическими, многокомпонентными, динамическими и распределёнными организационными системами, в том числе функционирующими в условиях неопределённости, кооперативного или конкурентного взаимодействия элементов, с учётом коммуникативной поддержки и информационного противодействия (Д.А. Новиков, В.Н. Бурков, М.В. Губко, Н.А. Коргин, С.П. Мишин, А.Г. Чхартишвили). На их основе разработаны комплексы прикладных механизмов управления, эффективность которых подтверждена при разработке и практическом внедрении механизмов управления проектами федерального, регионального и корпоративного уровней (В.А. Ириков, А.В. Щепкин).

Под руководством Л.Б. Рапопорта исследуются неголономные и другие механические системы. Решена известная задача управления неголономной системой с качением — стабилизация движе-

ния колесной системы (КС) вдоль заданной траектории. Построен закон управления, стабилизирующий движение КС вдоль плоской гладкой кривой. По основным переменным обеспечивается устойчивость в большом. Обоснована устойчивость КС при учете погрешностей измерения переменных состояния. Разработаны методы оценки области устойчивости КС в условиях ограничений на управление. Построены численные методы построения оценок областей устойчивости и достижимости. Построены законы управления с учетом фазовых ограничений, наложенных на состояния КС. Например, синтезированы управления в классе кусочно-линейных функций с насыщением для учета ограниченности угла поворота ведущих колес. Разрабатываются грубые законы управления прикладного характера — для КС типа автономных мобильных роботов.

По направлению устойчивости, резонансов и управления движением механических систем, в частности, исследуются: достаточные условия рождения изолированного колебания и его устойчивости в обыкновенной точке семейства в системе общего вида; сценарии рождения колебаний для критической точки семейства; конструктивные условия рождения и устойчивости колебаний как в нерезонансном, так и в резонансном случаях в системе общего вида; условия стабилизации колебания системы, состоящей из слабосвязанных подсистем (В.Н. Тхай).

Под руководством С.К. Даниловой ведутся работы по разработке метода определения экстремальных свойств оптимального управления морскими подвижными объектами (МПО) для построения эффективных алгоритмов реализации принципа максимума. Разрабатывается методика синтеза субоптимального управления движением МПО с использованием оценок экстремальных свойств оптимального управления объектом и заданных оценок текущих и прогнозируемых ситуаций по состоянию технических средств и систем управления объекта, воздействию внешней среды и гипотез о возможных вариантах развития ситуаций в нештатных и аварийных режимах. Разрабатываются алгоритмы синтеза альтернативных безопасных траекторий движения МПО с применением методов субоптимального управления и динамических оценок текущих и прогнозируемых ситуаций, построенных с помощью динамических экспертных систем продукционного типа.

Осуществляются разработка и исследование методов построения и особенностей функционирования сложных программно-технических комплексов для АСУТП. Проводятся теоретические исследования методов построения баз знаний для создания нового поколения систем управления на базе аппарата нечетких множеств, моделирование объектов управления в качественных шкалах и





автоматическая генерация баз знаний на основе накопленных опытных данных. Разрабатываются программные системы, позволяющие создавать «под ключ» системы автоматического управления с встроенными базами знаний для задач ранней диагностики и др. Практическая значимость результатов состоит в возможности применения данной методологии для создания макета сложной программно-технической системы управления объектами повышенной опасности, отвечающей современным требованиям открытых систем (АСУТП АЭС в РФ, Иране, Индии — Н.Э. Менгазетдинов, А.Г. Полетыкин).

Под руководством М.Х. Дорри ведётся разработка теоретических основ создания исследовательских комплексов и стендов для анализа, синтеза и отладки алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных систем управления сложными техническими комплексами с использованием интегрированных систем обработки данных на основе:

- блочно-иерархического структурирования задачи;
- объединения расчета непрерывных и логических процессов;
- образного представления объектов;
- организации многоуровневого взаимодействия блоков между собой и с системой;
- взаимодействия инструментальной системы с базами данных и модулями, имитирующими исследуемые объекты и помогающими легко реконструировать решаемые задачи.

Ведутся инициативные работы по новому направлению нанодатчиков, не имеющего аналогов в мире: по туннельным датчикам на основе магнитных квантовых точек (совместно с ФИ РАН и ТЦ МИЭТ), магниторезистивные (МР) свойства которых обнаружены сотрудниками ФИАН. Ведутся работы в целях получения и исследования наноземельных элементов на основе магнитополупроводниковых МР наноструктур. Разрабатываемые нанодатчики составят конкуренцию существующим анизотропным и спин-вентильным МР датчикам магнитного поля и тока (С.И. Касаткин).

Разработаны концепция новой Интернет-службы и принципы построения специализированных средств и технологий для поддержки удаленных взаимодействий в гетерогенной информационной и сетевой среде, ориентированных на решение следующих системных задач (В.Н. Лебедев):

- создание простого, интуитивно понятного средства сетевой поддержки распределенных приложений и многоагентных систем;
- обеспечение защиты от потери данных в условиях некачественных каналов связи (надежность и устойчивость к сетевым сбоям);

- создание средств межсерверной маршрутизации данных, одинаково применимых как для on-line, так и для off-line взаимодействий.

В последние годы разработаны многоканальные радиочастотные датчики: запасов топлива в баках переменной конфигурации; положения границ раздела и инвариантных измерений уровня; толщины покрытий и насыпных материалов; объемного содержания в многокомпонентных эмульсионных и слоистых потоках (Б.В. Лункин). Важной составляющей в этих датчиках являются алгоритмы: от простых (линейная комбинация двух частот) — для температурной компенсации, до сложных (системы уравнений) — для определения положения размытых границ раздела слоистых сред. Ведутся новые разработки, направленные на создание комбинированных датчиков на основе возбуждения в них электромагнитных и акустических колебаний в режиме резонанса. Они особенно важны для решения задач измерений параметров многокомпонентных нестационарных потоков.

Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение подсистем АСУ оперативной диспетчерской службы Департамента жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства Москвы с формализацией технологических процессов уборки снега в крупных городах, начиная от задач планирования объемов работ по поступающему метеопрогнозу и заканчивая задачами оперативного управления вывозом снега (Г.Г. Гребенюк). Разработана и сдана в эксплуатацию первая очередь информационной системы обеспечения градостроительной деятельности для муниципальных образований. Система предназначена для Комитета архитектуры и градостроительства Сургутского района Ханты-Мансийского автономного округа и является одной из первых в РФ. Подготовлены предложения по комплексной инновационной программе развития Московского мегаполиса «Комплекс приоритетных инновационных проектов повышения эффективности управления и жизнеобеспечения мегаполиса». Данная программа ориентирована на разработку прорывных инновационных проектов, охватывает с системных и управленческих позиций основы жизнедеятельности г. Москвы с учётом современных тенденций глобализации и мирового развития для социальной защищенности населения и обеспечения более высокого уровня устойчивого развития города.

Сформированы совместные научные проекты с Национальной академией наук Украины (соруководитель от НАНУ — академик НАНУ В.М. Кунцевич) и Национальной академией наук Беларуси (соруководитель от НАНБ — чл.-корр. НАНБ Ф.М. Кириллова). В сотрудничестве с Институтом динамики систем и теории управления СО РАН, ранее возглавлявшимся С.Н. Васильевым, а ныне чл.-корр. РАН И.В. Бычковым, развивается веду-





щая научная школа по устойчивости и управлению в гетерогенных и некоторых других моделях динамических и интеллектуальных систем. Тридцать пять научных докладов сотрудников Института было включено в программу 17-го Конгресса ИФАК (июль 2008 г., Сеул, Корея). Обновлены и расширены составы Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации и редколлегии журнала «Автоматика и телемеханика» — первого в мире журнала по автоматическому управлению, созданного ещё в 1936 г. (главный редактор — С.Н. Васильев).

С 2009 г. началась работа сотрудников Института по трём Программам Президиума РАН:

- «Математическая теория управления», координатор — академик Н.Н. Красовский.
- «Научные основы эффективного природопользования, развития минерально-сырьевых ресурсов, освоения новых источников природного и техногенного сырья», координатор — академик Д.В. Рундквист.
- «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов», координатор — академик Ж.И. Алфёров.

Сотрудники Института участвуют также в двух Программах Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН:

- «Управление движением, теория сложных информационно-управляющих систем», сокоординаторы — академики С.Н. Васильев и А.Б. Куржанский;
- «Проблемы управления и безопасности энергетики и технических систем», сокоординаторы — академик Ф.Л. Черноушко и чл.-корр. РАН Н.А. Махутов.

Фундаментальные и прикладные исследования проводятся в Институте также в рамках трёх региональных программ, в рамках 7-й рамочной Программы сотрудничества ЕС и России, по заказам Министерства обороны, Министерства внутренних дел, Федерального агентства по атомной энергии, Федерального космического агентства, Национального бюро Интерпола и многих других организаций и ведомств. Сотрудники Института участвуют в работах по 35-ти грантам Российского фонда фундаментальных исследований, пяти международным договорам.

В рамках Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации»:

— на основе принципов современного комплексного контроля и анализа экологической ситуации в зоне техногенного воздействия объекта хранения и уничтожения химического оружия разработана, обоснована и реализована на трёх объектах методология построения систем производственного экологического мониторинга для объектов повышенного риска; с помощью оперативного и интеллектуального анализа данных разработаны методы, позволяющие решать задачи классификации, идентификации и прогнозирования экологических ситуаций;

— разработана и реализована методология построения компьютерных тренажёрных комплексов для выработки у оперативного персонала навыков безопасного и эффективного управления технологическими процессами путём воссоздания и анализа ситуаций, которые могут возникнуть как в штатном режиме, так и при неполадках и аварийных ситуациях (В.Г. Лебедев, Ю.С. Легович).

Институт имеет крупные контракты с отечественными и зарубежными фирмами, в том числе, связанными с инвестиционной деятельностью.

В 2007 г. в Институте созданы школы молодых учёных, развиваются другие формы интенсификации финансовой поддержки научных исследований молодых ученых. Воссоздан Совет молодых ученых и специалистов, который активно включился в организацию и проведение различных конкурсов работ молодых ученых и молодежных научных конференций по проблематике Института. В Институте действуют четыре диссертационных совета по восьми специальностям.

Ежегодно в Институте проводится ряд международных и всероссийских научных и научно-практических конференций и семинаров по различным направлениям теории управления. В их работе принимают участие сотни ведущих специалистов российской и мировой науки об управлении. В частности, в январе 2009 г. состоялась международная мультikonференция «Теория и системы управления», организованная на базе трех институтов РАН: ИПУ, ИПМех и ИСА.

Сегодня, как и на протяжении всей своей славной истории, Институт остается лидером российской науки управления. Редколлегия, редакция и читатели журнала поздравляют Институт проблем управления и его сотрудников с юбилеем!

Настоящий специальный выпуск журнала посвящён 70-летию Института проблем управления. Статьи отражают основные направления исследований коллектива Института и представлены к публикации председателями секций Учёного совета.



УДК 62-50

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Б.Т. Поляк

Рассмотрена история развития теории автоматического управления в Институте проблем управления с момента его создания по настоящее время. Упоминаются крупнейшие ученые Института, внесшие большой вклад в становление науки об управлении. Кратко обсуждены современные направления исследований.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, теория управления, линейные системы, нелинейные системы, дискретные системы, релейные системы, оптимальное управление, адаптивные системы, робастность.

ВВЕДЕНИЕ

Институт автоматики и телемеханики (ИАТ) был основан в 1939 г. во многом для осуществления автоматизации производства, развития телемеханики и других прикладных целей. Однако он был создан как институт Академии наук, и руководству было совершенно ясно, что прогресс в решении практических задач невозможен без развития теории на достаточно высоком уровне.

В первые же годы существования Института (и даже ранее, когда он функционировал как Комиссия по телемеханике и автоматике) его сотрудники публикуют работы по теории автоматического регулирования (в основном в журнале «Автоматика и телемеханика» — первом в мире журнале по этой тематике). Достаточно отметить два таких результата. В 1938 г. появляется статья А.В. Михайлова о графическом критерии устойчивости линейных систем (знаменитый «годограф Михайлова») [1]. В 1939 г. Г.В. Шипанов публикует статью [2] об инвариантном регуляторе, позволяющем полностью подавить произвольные внешние возмущения. Работа вызывает бурю возмущения, ее критикуют в журнале «Большевик», все это грозит Институту закрытием. Однако проблема инвариантности оказывается глубокой, после войны ей посвящают несколько специальных конференций и множество публикаций. Последняя такая конференция прошла в Институте проблем управления (ИПУ) в 2008 г. (опубликованы ее труды [3]), о драматической истории автора теории инвариант-

ности и ее последующем развитии можно прочесть в сборнике [4]. Большую роль в развитии математической теории управления в ИАТе сыграло приглашение в Институт опального академика Н.Н. Лузина, изгнанного из университета (о постыдной травле основателя московской математической школы сохранились материалы, они опубликованы в книге [5]).

После войны в Институте происходили знаменитые семинары А.А. Андропова, которые во многом определили круг научных интересов участников семинара, среди которых — А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин, А.В. Михайлов, М.А. Айзерман, М.В. Мееров, А.Я. Лернер, Б.Я. Коган, В.В. Солодовников и многие другие. Эти молодые ученые с огромным энтузиазмом принялись за решение теоретических задач и на многие годы определили высочайший уровень теоретических исследований в Институте. Ниже я остановлюсь (поневоле кратко) лишь на некоторых направлениях исследований.

1. ТЕОРИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Одним из первых в Институте стало развиваться новое направление — теория дискретных систем. Фактически, такие системы возникли ещё на заре развития техники автоматического регулирования — достаточно вспомнить прерывистые и релейные регуляторы паровых машин, импульсную радиосвязь, радиолокацию. Однако адекватной теории подобных управляющих устройств тогда не существовало.



С 1948 г. Я.З. Цыпкин начал разрабатывать единый подход к описанию дискретных систем (первоначально они назывались прерывистыми). Этот подход был основан на идее дискретного преобразования Лапласа (Z -преобразования) и позволил синтезировать цельный математический аппарат, подобный операторному методу описания непрерывных систем. Это позволило ввести для дискретных систем стандартные понятия передаточной функции, частотной характеристики и им подобные и обобщить классические критерии устойчивости Найквиста и Михайлова на случай дискретных систем. Полученные на этом этапе результаты были подытожены в монографии Я.З. Цыпкина [6], вышедшей в 1951 г.

Дальнейшее развитие теории импульсных систем шло по пути разработки частотных методов исследования как при детерминированных, так и случайных внешних воздействиях. Кроме того, удалось установить специфическое свойство дискретных систем — существование процессов конечной длительности, в теории линейных непрерывных систем попросту невозможных. Этот факт лёг в основу фундаментального понятия управляемости, введённого Р. Калманом.

Все эти результаты нашли отражение в книгах [7, 8].

Следующим шагом стало исследование оптимальных дискретных систем. Теория таких систем (линейно-квадратичная оптимизация, условия экстремума, численные методы) была развита в работах Я.З. Цыпкина, Л.И. Розоноэра, А.И. Проппа, А.Г. Бутковского в 1960-е гг.

Впоследствии теория дискретных систем стала удобным аппаратом для исследования адаптивных и обучающихся систем управления. Значительно позже, в 1990-е гг., дискретные системы вновь привлекли внимание исследователей Института проблем управления в связи с проблемой робастности. Были построены графические критерии робастной устойчивости таких систем и методы синтеза робастных регуляторов для них (Я.З. Цыпкин, Б.Т. Поляк).

2. РЕЛЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ

К работам по дискретным системам тесно прилегают исследования по релейным системам. В отличие от дискретных систем, в релейных квантование производится не по времени, а по уровню управления. Такие системы неизбежно являются нелинейными, и в них могут возникать свойственные нелинейным задачам эффекты, исследовавшиеся ещё в пионерских работах А.А. Андропова [9]. Эти работы были продолжены М.А. Айзерманом, В.В. Петровым, Г.М. Улановым, В.Ю. Рутковским. Систематическая теория релейных сис-

тем управления была создана Я.З. Цыпкиным; его книга [10] вышла в свет в 1955 г. и была переведена на немецкий, японский, испанский и английский языки. Яков Залманович разработал конструкцию «годографа Цыпкина» — графический частотный метод для изучения вынужденных колебаний в замкнутых релейных системах. В целом для релейных систем были созданы методы расчёта, которые по своей эффективности оказались близки к тем, что применялись в теории линейных систем. За работы по теории импульсных и релейных систем Я.З. Цыпкину в 1960 г. была присуждена Ленинская премия.

3. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Релейное управление может возникнуть и в линейных оптимальных задачах при наличии ограничений на управление. Впервые этот факт был установлен для одного частного случая А.А. Фельдбаумом в 1949 г. [11], позже им же и А.Я. Лернером были получены более общие результаты того же типа (например, знаменитая «теорема об n -интервалах» [12]). Эти работы проложили путь к созданию общей теории оптимального управления.

Первоначально исследовались линейные системы и задачи быстродействия для них. Довольно скоро стало ясно, что можно построить теорию оптимальных систем и для нелинейных задач и более общих критериев оптимальности, а также более общих ограничений на управление. Взаимодействие А.А. Фельдбаума с математиками из Математического института им. В.А. Стеклова привело последних к созданию общей теории оптимального управления в форме «принципа максимума Л.С. Понтрягина» [13]. Большую роль в разъяснении этих математических результатов для инженеров сыграл цикл статей Л.И. Розоноэра 1959 г. [14], в них он дал и более простое доказательство принципа максимума, обобщил его на ряд других задач и продемонстрировал его использование в приложениях.

Последующее развитие оптимального управления шло в рамках описания систем в терминах пространства состояний, введённого Р. Калманом. Значительным шагом явилось создание «аналитического конструирования регуляторов» А.М. Лётовым [15]; сейчас более употребителен термин «линейно-квадратичный регулятор», использовавшийся в работах американских ученых Р. Беллмана и Р. Калмана. Оказалось, что для случая линейной системы, квадратичного критерия оптимальности и отсутствия ограничений на управление оптимальное программное управление записывается в форме линейной обратной связи, общепринятой в «инженерной» теории управления. Это перекинуло мостки между двумя теориями.



Еще в 1960-е гг. были предложены важные обобщения теории оптимального управления. Так, А.Г. Бутковский развил теорию для случая распределенных систем [16]. В.С. Пугачев изучал стохастические постановки задачи оптимального управления [17]. В.Ф. Кротов предложил технику достаточных условий оптимальности («функции Кротова») для построения оптимального управления (более подробно об этой технике можно прочесть в книге [18]).

4. СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

В линейных системах обычно применяется управление в форме линейной обратной связи, однако возможности такого управления (и в смысле борьбы с неопределенностью системы, и в смысле качества системы) весьма ограничены. В 1960-е гг. С.В. Емельяновым был предложен новый закон управления, когда линейная обратная связь различна в разных областях пространства состояний. Такие системы с переменной структурой обладают большими возможностями, их изучение подытожено в книге [19]. К этим исследованиям присоединился В.И. Уткин [20]. В 1972 г. С.В. Емельянов и В.И. Уткин были удостоены Ленинской премии за работы по данной тематике. В настоящее время эта техника нашла множество практических приложений и очень популярна за рубежом; в нашем институте исследования в этом направлении ведут В.А. Уткин и С.А. Краснова [21].

5. НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ

Линейная теория является лишь приближением в описании реальных объектов управления, которые практически всегда нелинейны. Поэтому в теории автоматического регулирования, начиная с самых первых ее шагов, существовал интерес к нелинейным системам и способам управления ими. К этому следует добавить существование первоклассной школы по нелинейным колебаниям, возглавляемой А.А. Андроновым, и технику исследования нелинейных систем, заложенную А.М. Ляпуновым. Неудивительно, что в ИАТе уже в первые послевоенные годы были осуществлены первоклассные исследования в области нелинейных систем. Здесь в первую очередь следует выделить знаменитую задачу абсолютной устойчивости. Ее формулировка звучит весьма современно — изучается устойчивость не индивидуального объекта, а целого класса систем с данной характеристикой нелинейности (например, секторной). Иначе говоря, это проблема робастной устойчивости. Большую роль сыграла гипотеза М.А. Айзермана (1948 г.) о критериях абсолютной устойчивости и впоследствии монография [22]. Эти исследования

были успешно продолжены Е.С. Пятницким. Он применял продуктивный вариационный подход к абсолютной устойчивости, исследовал управление механическими системами. Посмертно его работы собраны в книге [23]. В настоящее время тематика абсолютной устойчивости с использованием нового аппарата (в частности, линейных матричных неравенств и обобщений S -теоремы) развивается Л.Б. Рапопортом и его коллегами по лаборатории. Им удалось применить эти методы для описания области притяжения нелинейных систем, см., например, статью [24].

Другие проблемы, относящиеся к нелинейным системам, разрабатывались М.А. Красносельским и сотрудниками его лаборатории в 1970—1980-е гг. В частности, была построена теория систем с гистерезисной нелинейностью и проведена их классификация (совместно с А.Б. Покровским) [25]. Исследовались условия возникновения периодических режимов в нелинейных системах. Ученик М.А. Красносельского Н.А. Бобылев в цикле работ совместно с С.В. Емельяновым и С.К. Коровиным развил геометрические методы в вариационных задачах [26].

Под руководством В.П. Жукова в его лаборатории сейчас ведутся работы по критериям асимптотической устойчивости нелинейных систем; Э.М. Солнечный получил результаты по управлению системами с распределенными параметрами.

Для нелинейных систем характерно возникновение хаотических режимов; способы управления хаосом предложены Б.Т. Поляком [27].

6. АДАПТИВНЫЕ И ОБУЧАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

Уже более 50 лет назад теоретики управления понимали, что, как правило, точное описание системы управления недоступно, и неизбежные неопределенности параметров и характера динамики системы приводят к необходимости синтеза управлений в условиях неопределенности. В рассматриваемой ситуации наиболее естественно воспользоваться стратегией адаптивного управления, когда одновременно происходит и уточнение описания системы, и управление ею. Наиболее глубоко идея подобного подхода была воплощена в концепции дуального управления А.А. Фельдбаума. По логике Фельдбаума, управление имеет двойственную природу: с одной стороны, оно является пробным воздействием, предназначенным для изучения управляемой системы, а с другой — решает некоторую задачу оптимизации. Влияние, которое оказала теория дуального управления на современную теорию управления, трудно переоценить. Недаром цикл статей А.А. Фельдбаума, вышедший в 1960—1961 гг. [28], был признан специальной комиссией ИФАК одной из «вех» науки об управле-



нии в XX в. Однако непосредственное формирование оптимального дуального управления возможно лишь в очень редких случаях, вот почему внимание исследователей сконцентрировалось на применении более простых стратегий — стратегий адаптивного управления. Например, в работах В.Ю. Рутковского и его сотрудников применялся удобный метод эталонной модели.

Другая волна исследований по адаптивным и обучающимся системам была связана с тем, что ещё в конце 1950-х гг. появились (в рамках науки, которая тогда называлась «кибернетика») работы по распознаванию образов и обучению автоматических систем. В Институте эти работы развивались по двум направлениям. С одной стороны, М.А. Айзерман и его сотрудники Л.И. Розоноэр и Э.М. Браверман разработали модель распознавания, связанную с разделением компактных множеств точек в пространстве образов, и предложили для решения задачи метод потенциальных функций. Эти исследования были позже подытожены в их монографии [29], вышедшей в 1970 г. С другой стороны, А.Я. Лернером и В.Н. Вапником для решения той же задачи распознавания был разработан метод «обобщённого портрета». Впоследствии этот результат лёг в основу очень глубоких исследований В.Н. Вапника и А.Я. Червоненкиса, связанных с решением проблемы восстановления зависимостей по экспериментальным данным [30, 31].

Родство задач распознавания и обучения с общими проблемами теории адаптации было подмечено Я.З. Цыпкиным в середине 1960-х гг. Он первым понял, что общим математическим аппаратом для их исследования могут служить рекуррентные стохастические алгоритмы (в частности, уже известный в статистике метод стохастической аппроксимации). Оказалось, что в этих рамках могут быть рассмотрены столь разнообразные задачи, как оценивание параметров, идентификация, распознавание образов, стохастическая оптимизация и ряд других базовых задач теории управления. Первоначально эти идеи вызвали острую дискуссию; не сразу было осмыслено их соотношение с классическими статистическими методами и методом потенциальных функций. Позднее, после выхода из печати книг Я.З. Цыпкина [32, 33] метод стохастической аппроксимации стал общепризнанным инструментом описания и исследования рекуррентных адаптивных процедур. В работах Я.З. Цыпкина и Б.Т. Поляка 1970—1980-х гг. была строго исследована сходимость и скорость сходимости адаптивных алгоритмов и предложены оптимальные (по скорости сходимости) версии алгоритмов [34]. Те же авторы предложили робастные варианты алгоритмов, сохраняющие работоспособность при недостаточной информации о вероятностных свойствах помех [35].

7. РОБАСТНЫЕ СИСТЕМЫ

Как уже отмечалось, основная идея адаптивных методов управления заключается в одновременном решении двух задач: исследовании системы и управлении ею во имя достижения некоторой заданной цели. Однако встречаются ситуации, когда идентификация системы невозможна или нежелательна, и тогда необходимо применять методы робастного управления, т. е. управления в условиях неопределённости. По существу, уже сам классический принцип обратной связи имеет своей целью устранение неизбежных неопределённостей в функционировании и, соответственно, описании системы. Теория робастного управления по-настоящему заинтересовала учёных сравнительно поздно, в 1990-е гг., хотя некоторые фундаментальные идеи робастности присутствовали в теории управления с самого ее зарождения. Первые результаты в этой области относились к анализу систем с неопределённостями — удалось построить робастные аналоги основных критериев устойчивости линейных систем. Так, например, робастный вариант критерия Михайлова позволяет проверить устойчивость интервального семейства полиномов («годограф Цыпкина—Поляка»). Эти результаты были обобщены на многие другие проблемы анализа робастной устойчивости (критерий Найквиста, дискретные системы, нелинейно входящие параметры и др.) Серьёзные результаты были получены и в задачах робастного синтеза (т. е. проектирования регуляторов для робастных систем). В книге Б.Т. Поляка и П.С. Щербакова [36] описываются основные итоги этих исследований.

8. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ

В 1970-е гг. казалось, что классическая теория линейных систем полностью завершена, и ждать здесь каких-то новых прорывов не приходится. Впоследствии оказалось, что это совершенно не так.

Прежде всего, как уже отмечалось, возникла робастная теория линейных систем. Мы говорили ранее о задачах с параметрической неопределённостью; другой важный класс систем — с частотной неопределённостью. Здесь в 1980-е гг. в работах западных ученых (Зеймс, Гловер, Френсис, Дойл и др.) была создана чрезвычайно плодотворная теория H_∞ -робастности. Эта же H_∞ -теория оказалась очень полезной при постановке задач оптимального управления (H_∞ -оптимизация) и при решении стохастических задач управления. В нашем институте первыми энтузиастами новой теории стали А.С. Позняк и А.П. Курдюков. В частности, еще в 1991 г. А.С. Позняк выпустил бро-





шюру о H_∞ -теории, по-видимому, первую в нашей стране [37]. Ныне А.П. Курдюков со своими учениками развивает анизотропный подход в рамках этой теории [38].

Далее, некоторые старые идеи обрели новое дыхание. Так, восходящая еще к И.А. Вышнеградскому (1876 г.) задача выделения области устойчивости линейной системы в пространстве двух параметров была успешно решена в рамках так называемого D -разбиения (Неймарк, 1948). Впоследствии оказалось, что эта задача важна как при синтезе регуляторов низкого порядка, так и при анализе робастной устойчивости. В работах молодых исследователей из ИПУ Е.Н. Грязиной и А.А. Трембы удалось значительно развить теорию D -разбиения. Выяснена геометрия области устойчивости для непрерывных и дискретных систем, исследован матричный аналог задачи, предложено обобщение на случай большего чем два числа параметров, построены робастные варианты D -разбиения и его аналог для H_∞ -оптимизации [39].

Затем была развита новая техника линейных матричных неравенств (ЛМН) для анализа и синтеза линейных систем. Основы этого подхода были заложены еще А.М. Ляпуновым; В.А. Якубович первым записал некоторые задачи управления на языке ЛМН. Однако лишь после выхода в 1994 г. монографии американского ученого С. Бойда с соавторами техника ЛМН превратилась в удобный и общепринятый аппарат исследования разнообразных задач управления. Ситуация облегчалась тем, что в работах А. Немировского и Ю. Нестерова были предложены эффективные методы внутренней точки для решения ЛМН. Написанные на их основе программные средства сделали решение ЛМН алгоритмически удобным и доступным средством. На основе этого подхода удалось (Б.Т. Поляк, С.А. Назин, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков) решить важную задачу подавления постоянно действующих возмущений. Эта задача стояла с момента возникновения теории линейных систем, но ее удавалось решить лишь для некоторых типов возмущений (единичный скачок, гармонические возмущения, гауссовские помехи и т. д.) Для наиболее распространенного класса произвольных ограниченных возмущений проблема оставалась открытой. Здесь следует отметить пионерские исследования Б.В. Булгакова (1946 г.) по анализу таких систем и их обобщения в трудах Ф.Л. Черноусько и А.Б. Куржанского. Однако задача синтеза регуляторов при наличии подобных возмущений представляла большие трудности. Развита в лаборатории № 7 техника инвариантных эллипсоидов в сочетании с аппаратом ЛМН позволила преодолеть эти трудности [40, 41].

Наконец, весьма плодотворной для решения классических трудных задач теории управления оказалась идея рандомизации. К их числу относятся проблема синтеза регуляторов низкого порядка, проблема статической стабилизации по выходу, робастная стабилизация при матричной неопределенности и многие другие. Систематические аналитические или численные методы решения здесь отсутствуют, тем не менее, все эти задачи очень важны. Рандомизированные алгоритмы (типа методов Монте-Карло или случайного поиска) позволяют в ряде случаев находить решение. Так, построены способы генерации случайных устойчивых полиномов и матриц, методы генерации случайных стабилизирующих регуляторов, рандомизированные методы решения ЛМН и задач оптимизации. Все эти подходы используются в работах Б.Т. Поляка, П.С. Щербакова, Е.Н. Грязиной и Я.И. Петрикевич для решения разнообразных задач управления линейными системами [42].

9. ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Помимо упомянутых основных областей теории управления, есть ряд направлений исследований в нашем институте, выходящих за их рамки. Так, А.Г. Бутковский разрабатывает единую геометрическую теорию управления, которая позволяет взглянуть на всю тематику управления с самых общих и абстрактных позиций [43]. В его лаборатории продолжается и исследование методов подвижного управления в задачах с распределенными параметрами [44]. В.Ф. Кротов использует управленческую идеологию для описания проблем квантовой физики [45].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

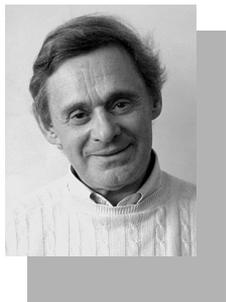
Разумеется, в этом обзоре мы были лишены возможности дать сколько-нибудь полную картину теоретических исследований в Институте проблем управления. Тем не менее, даже по вышеприведенному краткому описанию можно заключить, что хотя эпоха бурного развития теории автоматического управления в нашем институте позади (ее пик пришелся на 1950—1960-е гг.), ее традиции живы и развиваются поныне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В. Методы гармонического анализа в теории регулирования // Автоматика и телемеханика. — 1938. — № 3.
2. Щипанов Г.В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. — 1939. — № 1. — С. 4—37.



3. *70 лет теории инвариантности* / Ред. С.Н. Васильев. — М.: Ред. ЛКИ, 2008.
4. *Щипанов и теория инвариантности* / Ред. З.М. Лезина, В.И. Лезин. — М.: Физматлит, 2004.
5. *Дело академика Н.Н. Лузина* / Ред. С.С. Демидов, Б.В. Левшин. — СПб.: РХГИ, 1999.
6. *Цыпкин Я.З. Переходные и установившиеся процессы в импульсных системах.* — М.: Госэнергоиздат, 1951.
7. *Цыпкин Я.З. Теория импульсных систем.* — М.: Физматгиз, 1958.
8. *Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем.* — М.: Физматгиз, 1963.
9. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний.* — М.: Физматгиз, 1959.
10. *Цыпкин Я.З. Теория релейных систем автоматического регулирования.* — М.: Гостехиздат, 1955.
11. *Фельдбаум А.А. Простейшие релейные системы автоматического регулирования* // Автоматика и телемеханика. — 1949. — Т. 10, № 4.
12. *Фельдбаум А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования* // Автоматика и телемеханика. — 1953. — Т. 14, № 6.
13. *Математическая теория оптимальных процессов* / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. — М.: Наука, 1961.
14. *Розоноэр Л.И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в теории оптимальных систем, 1—3* // Автоматика и телемеханика. — 1959. — Т. 20, № 10—12.
15. *Лётов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов, 1 — 4* // Там же. — 1960. — Т. 21, № 4 — 6; 1961. — Т. 22, № 4.
16. *Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами.* — М.: Наука, 1965.
17. *Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления.* — М.: Физматгиз, 1960.
18. *Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления.* — М.: Физматгиз, 1973.
19. *Емельянов С.В. Системы автоматического регулирования с переменной структурой.* — М.: Наука, 1967.
20. *Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой.* — М.: Наука, 1974.
21. *Уткин В.А. Краснова С.А. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем.* — М.: Наука, 2006.
22. *Айзерман М.А., Гантмахер Ф.Р. Абсолютная устойчивость нелинейных регулируемых систем.* — М.: Изд. АН СССР, 1963.
23. *Пятницкий Е.С. Избранные труды. Теория управления.* — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1; 2005. — Т. 2.
24. *Рапопорт Л.Б., Морозов Ю.В. Оценка области притяжения инвариантного множества в задаче управления колесным роботом* // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 11. — С. 48—61.
25. *Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом.* — М.: Наука, 1983.
26. *Бобылев Н.А., Емельянов С.В., Коровин С.К. Геометрические методы в вариационных задачах.* — М.: Магистр, 1998.
27. *Поляк Б.Т. Стабилизация хаоса с помощью прогнозирующего управления* // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 11. — С. 99—112.
28. *Фельдбаум А.А. Теория дуального управления, 1 — 4* // Там же. — 1960. — Т. 21, № 9, 11; 1961. — Т. 22, № 1, 3.
29. *Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциальных функций в теории обучения машин.* — М.: Наука, 1970.
30. *Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов.* — М.: Наука, 1974.
31. *Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным.* — М.: Наука, 1979.
32. *Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах.* — М.: Наука, 1968.
33. *Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем.* — М.: Наука, 1970.
34. *Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Оптимальные псевдоградиентные алгоритмы адаптации* // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 8. — С. 74—81.
35. *Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Робастные псевдоградиентные алгоритмы адаптации* // Там же. — 1980. — № 10. — С. 91—97.
36. *Поляк Б.Т., Шербаков П.С. Робастная устойчивость и управление.* — М.: Наука, 2002.
37. *Позняк А.С. Основы робастного управления (H_∞ -теория).* — М.: МФТИ, 1991.
38. *Курдюков А.П., Максимов Е.А. Робастная устойчивость линейных дискретных систем с неопределенностью, ограниченной по анизотропийной норме* // Доклады РАН. — 2005. — Т. 400, № 2. — С. 178—180.
39. *Грязина Е.Н., Поляк Б.Т., Тремба А.А. Современное состояние метода D -разбиения* // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 12. — С. 3—40.
40. *Назин С.А., Поляк Б.Т., Топунов М.В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов* // Там же. — 2007. — № 3. — С. 106—125.
41. *Поляк Б.Т., Топунов М.В. Подавление ограниченных внешних возмущений: управление по выходу* // Там же. — 2008. — № 5. — С. 72—90.
42. *Polyak B.T., Gryazina E.N. Hit-and-Run: New Design Technique for Stabilization, Robustness and Optimization of Linear Systems* / 17th World IFAC Congress, Seoul, July 2008. — P. 376—380.
43. *Бабичев А.В., Бутковский А.Г., Похйолайнен С. К единой геометрической теории управления.* — М.: Наука, 2001.
44. *Кубышкин В.А., Финягина В.И. Подвижное управление в системах с распределенными параметрами.* — М.: СИНТЕГ, 2005.
45. *Кротов В.Ф. Оптимальное управление квантовыми системами* // Доклады РАН. — 2008. — Т. 423, № 3. — С. 316—319.



Поляк Борис Теодорович — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией им. Я.З. Цыпкина ИПУ, профессор МФТИ. Председатель секции «Теория автоматического управления» Ученого совета ИПУ. Автор 4-х монографий, 180-ти статей в журналах и свыше 150-ти докладов на российских и международных конференциях. Основные работы — по теории управления и оптимизации. Зам. главного редактора журнала «Автоматика и телемеханика» и член редколлегий 5-ти международных журналов. Лауреат премии им. А.А. Андропова РАН, премий им. В.С. Кулебакина, А.М. Лётова, А.А. Фельдбаума, Я.З. Цыпкина ИПУ. Почетный член ИФАК (IFAC Fellow). Работал в университетах США, Франции, Италии, Израиля, Тайваня и др. Свыше 20-ти его учеников — кандидаты и доктора наук. ☎(495) 334-88-29, ✉boris@ipu.ru.

Т еория управления социально-экономическими и организационными структурами

УДК 62-50

МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРТНО-КЛАССИФИКАЦИОННОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ СЛОЖНООРГАНИЗОВАННЫХ ДАННЫХ (история и перспективы развития)

А.А. Дорофеюк

Рассмотрена история и перспективы развития методологии структурно-классификационного анализа сложноорганизованных данных — стремительно развивающееся как в России, так и за рубежом направления, «выросшего» из статистических методов обработки данных и распознавания образов. Описаны как теоретические, так и прикладные полученные результаты.

Ключевые слова: экспертно-классификационный анализ; автоматическая классификация, экстремальная группировка параметров; кусочная аппроксимация сложных зависимостей; структурное прогнозирование; многовариантная экспертиза.

ВВЕДЕНИЕ

Основу методологии структурно-классификационного анализа данных заложили работа Э.М. Бравермана 1960 г. и последующие работы Э.М. Бравермана и А.А. Дорофеюка 1963—1966 гг., которые выполнялись в лаборатории Института автоматики и телемеханики (ныне Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН), руководимой М.А. Айзерманом. Зарождение и пути развития этой тематики подробно рассмотрены и проанализированы в статье [1] из сборника, посвящённого памяти выдающегося советского и российского учёного — Марка Ароновича Айзермана. Отметим только, что именно М.А. Айзерману принадлежит идея формирования нового научного направления, связанного с моделированием способности многих биологических объектов к самообучению, к формированию новых понятий, способности автономно группировать наблюдаемые объекты (или события) в классы «подобных». Сейчас это стремительно развивающееся направление, идеологически близкое к распознаванию образов, называют «интеллектуальным анализом данных», «структурно-классификационным анализом», «разведочным анали-

зом», на Западе оно известно, в основном, под названием «DATA MINING».

Основная идея этого направления состоит в следующем. Пусть имеется некоторый массив данных, описывающий состояние исследуемой группы из n объектов. Обычно под этим подразумевается, что имеется k параметров (числовых, качественных или номинальных), значения которых $x_j^{(i)}$ ($i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n$), и определяют этот массив как матрицу данных. В динамических случаях значения параметров изменяются со временем $x_j^{(i)}(t)$, поэтому массив становится трёхмерным (куб данных). Необходимо выявить структуру этого массива для построения сжатого, содержательно хорошо интерпретируемого описания исследуемых объектов с целью: идентификации основных характеристик их функционирования, выявления и прогнозирования интегральных показателей поведения объектов во времени, поиска закономерностей их взаимодействия и т. д. При этом выявление структуры производится по всем трём «направлениям» куба данных — структуре объектов в различных подпространствах параметров, структуре взаимосвязи параметров по данным имеющего-



ся массива, структуре динамических характеристик объектов (например, структуре траекторий параметров или интегральных показателей исследуемых объектов).

1. СТРУКТУРИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ

Для выявления структуры объектов широко применяются методы структурного анализа данных (другие названия: автоматическая классификация, кластер-анализ, самообучение, распознавание образов без учителя, численная таксономия, стратификация и др.). Основы теории и алгоритмической базы этого направления были заложены Э.М. Браверманом и А.А. Дорофеюком в 1961—1966 гг. в ИПУ РАН (в то время — ИАТ), а затем продолжены А.А. Дорофеюком и сотрудниками его лаборатории — Е.В. Бауманом, А.Л. Чернявским, И.Б. Мучником, Н.Е. Киселёвой, В.Г. Мовсумовым, А.Г. Дмитриевым, Ю.А. Дорофеюк. В Институте этой же проблематикой занимались также Я.З. Цыпкин, Г.К. Кельманс, Р.П. Агаев, В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис, А.Р. Стефанюк, А.А. Журавель, Касавин А.Д., В.Я. Лумельский. Из других научных центров, активно занимавшихся задачами этого направления, отметим ВЦ РАН (Ю.И. Журавлёв, К.В. Рудаков, В.В. Моттль, К.В. Воронцов и др.), ЦЭМИ РАН (С.А. Айвазян, З.И. Бежаева, И.С. Енюков, В.С. Мхитарян, О.В. Староверов, и др.), ЦНИИКА (И.Ш. Торговицкий, И.П. Баумштейн и др.), Институт математики СО АН СССР (Н.Г. Загоруйко, Г.С. Лбов, В.Н. Елкина и др.), ИЭОПП СО АН СССР (Б.Г. Миркин, В.Л. Купершток и др.), Горьковский (ныне Нижегородский) Государственный университет (Ю.И. Неймарк и его сотрудники), Институт кибернетики АН УССР (М.И. Шлезингер, В.А. Ковалевский, А.В. Миленький, А.Г. Ивахненко и др.). Из зарубежных центров упомянем университеты в Мэриленде, Лос-Анжелесе, Энн-Арборе, Пэдьо (США); Риме, Солерно, Удине, Милане, Национальную лабораторию кибернетики в Неаполе (Италия); Марселе, Экс-ин-Провансе, Бордо, Гренобле, университет Париж-IX, ИНРИА (Франция); технические университеты в Аахене и Брауншвейге (Германия), Международный институт прикладного системного анализа (Австрия). С большинством из них Институт долгие годы поддерживал плодотворное сотрудничество в рамках взаимного командирования специалистов, организации и проведения конференций и симпозиумов, межправительственных соглашений (Италия, Франция, Австрия), а также прямых договоров и соглашений между Академией наук или Институтом и зарубежными научными центрами — университетами в Удине, Солерно, Риме (Италия), ИНРИА (Франция), Мичиганский университет (Энн-Арбор, США).

1.1. Содержательная постановка задачи автоматической классификации

Пусть исследуется некоторое множество n объектов. Предположим, что все объекты разделены по своим свойствам на r классов, причем объекты с близкими свойствами попадают в один и тот же класс, а с существенно различными — в разные классы. Кроме того, будем предполагать, что каждый такой объект характеризуется значениями некоторого заранее выбранного набора из k параметров $\{x^{(1)}, \dots, x^{(k)}\}$, причём предполагается, что этот набор достаточно полно характеризует свойства исследуемых объектов, которые необходимо учитывать при их классификации. Введем в рассмотрение k -мерное пространство параметров X , в котором i -й оси соответствуют значения параметра $x^{(i)}$, т. е. j -му объекту в пространстве X соответствует точка $x_j = (x_j^{(1)}, \dots, x_j^{(k)})$. В соответствии со сделанными предположениями, близким в пространстве X точкам будут соответствовать объекты с близкими свойствами. Тогда задачу выявления структуры объектов можно поставить как задачу разбиения пространства X на такие r областей, чтобы близкие точки исходной выборки, как правило, попадали в одну и ту же область (задача автоматической классификации). Для случая конечной выборки задача сводится к выделению r изолированных, «компактных» групп точек (классов) исходной выборки в k -мерном пространстве параметров X .

За 10 лет (1960—1970 гг.) было опубликовано огромное число работ, в которых предлагались различные эвристические алгоритмы автоматической классификации, опирающиеся на содержательную постановку этой задачи, когда либо не формализован критерий качества классификации, либо не доказано, что алгоритм экстремизирует какой-либо формальный критерий. Разнообразие и особенности таких алгоритмов достаточно полно отражены в обзоре [2].

1.2. Формальная постановка задачи автоматической классификации

Впервые формальная постановка задачи автоматической классификации была сделана М.И. Шлезингером в 1963 г. (опубликована в 1965 г.). Он сформулировал критерий качества разбиения следующего общего вида:

$$R = \sum_{j=1}^r p_j \int_{A_j} \int_{A_j} S(x, y) P(x/j) P(y/j) dx dy, \quad (1)$$

где $S(x, y)$ — потери от отнесения точек x и y к одному и тому же классу A_j , $P(x/j)$ — условная плотность распределения вероятностей в классе A_j , p_j —





априорная вероятность класса A_j . Однако в дальнейшем он рассматривал только случай конечного классифицируемого множества точек с квадратичной функцией потерь $S(x, y) = (x - y)^2$. В этом случае критерий (1) принимает вид средневзвешенной

$$\text{дисперсии точек в классах } R(r) = \sum_{j=1}^r \sum_{x_i \in A_j} (x_i - c_j)^2,$$

где c_j — центр тяжести точек в классе A_j .

В это же время (1963—1966 гг.) в ИАТе были введены в рассмотрение формальные критерии качества классификации и разработаны алгоритмы их экстремизации. Здесь следует выделить два случая — конечное или бесконечное множество классифицируемых точек. Первые работы относились к существенно более простому случаю конечного числа классифицируемых точек. Был предложен целый ряд критериев качества классификации, базирующихся на характеристиках средней близости точек в классах и средней близости (удаленности) самих классов. В статье [3] был введен класс критериев $I = f(I_1, I_2)$, причем I должно увеличиваться с увеличением I_1 и уменьшаться с уменьшением I_2 . К такому классу относятся, например, критерии

$$I_3 = I_1 - qI_2, \quad I_4 = \frac{I_1}{I_2}, \quad I_5 = \frac{I_1 - qI_2}{I_1 + qI_2}, \quad (2)$$

где q — некоторая константа, корректирующая разномасштабность величин I_1 и I_2 . В выражениях (2) критерий I_1 — это средняя по классам мера

близости точек в классах $I_1 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r K(A_i, A_i)$, где

$$K(A_p, A_p) = \frac{2}{n_i(n_i - 1)} \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j>i} K(x_i, x_j),$$

а критерий I_2 — это средняя мера близости (удаленности) классов

друг от друга $I_2 = \frac{2}{r(r-1)} \sum_{i=1}^r \sum_{j>i} K(A_i, A_j)$, где

$$K(A_p, A_j) = \frac{1}{n_i n_j} \sum_{x_l \in A_i} \sum_{x_s \in A_j} K(x_l, x_s). \quad (3)$$

Здесь $K(x, y) = \frac{1}{1 + \alpha R^p(x, y)}$ — потенциальная функция, n_i — число точек в классе A_i , α и p — настраиваемые параметры. Ясно, что классификация тем лучше, чем больше I_1 и чем меньше I_2 .

Был разработан набор алгоритмов экстремизации введенных критериев для конечного n [3]. В последние годы для решения этой задачи был разработан высокоэффективный алгоритм m -локальной оптимизации (в составе комплекса алго-

ритмов структурно-классификационного анализа данных) [4].

Существенно более сложным является случай бесконечной классифицируемой последовательности объектов. Здесь можно использовать только рекуррентные алгоритмы. Первый рекуррентный алгоритм для такого случая был предложен и теоретически исследован Э.М. Браверманом [5], там же была доказана его сходимость. Критерий качества классификации (экстремизируемый функционал) и сам алгоритм формулируются на языке метода потенциальных функций [6], а именно: в спрямляющем пространстве Z (см. книгу [6]) критерий качества, предложенный в работе [5], является частным случаем критерия (1) для квадратичной функции потерь и может быть записан в виде (для наглядности рассмотрен случай $r = 2$)

$$K_1 = \int_A (z - z_A)^2 P(z) dz + \int_B (z - z_B)^2 P(z) dz = \\ = \frac{(M^A)^2}{p^A} + \frac{(M^B)^2}{p^B}, \quad (4)$$

где z_A и z_B — центры классов A и B соответственно, $P(z)$ — функция плотности распределения вероятностей появления точек классифицируемой последовательности, $M^A = \int_A z P(z) dz$ — первый ненор-

мированный момент класса A , а $p^A = \int_A P(z) dz$ —

априорная вероятность класса A (нулевой ненормированный момент). Аналогично определяются соответствующие величины для класса B .

В работе [5] была доказана важная теорема, позволяющая по виду аддитивного экстремизируемого функционала выбирать класс разделяющих поверхностей. В частности, для функционалов вида (4), зависящих только от ненормированных моментов не выше первого, можно брать линейные разделяющие функции $f(z) = (c, z) - a$. Для предложенного в работе [5] алгоритма впервые для бесконечного случая была доказана его сходимость, обеспечивающая стационарное значение (4).

В работе [7] предложены рекуррентные алгоритмы, являющиеся непосредственным обобщением алгоритмов, разработанных в работе [3] для конечного n , на случай бесконечной последовательности. В этом случае аналоги критериев I_1 , I_2 и I_3 могут быть записаны как выпуклые функционалы от нулевых и первых ненормированных моментов. В работе [8] была доказана теорема (обобщение теоремы Э.М. Бравермана [5]), в соответствии с которой оптимальные разделяющие функции для таких критериев можно также искать в классе линейных.



Отметим, что, в отличие от распознавания образов с учителем, теоретическое исследование сходимости рекуррентных алгоритмов автоматической классификации (распознавания образов без учителя) невозможно проводить классическими методами стохастической аппроксимации ввиду невыпуклости экстремизируемого функционала [2].

1.3. Вариационный подход

Следующий период исследований задач автоматической классификации был связан с так называемым вариационным подходом, т. е. рассмотрением уравнений, следующих из необходимых условий экстремума функционала качества классификации (равенства нулю первой его вариации). Теоретическую базу таких исследований заложил Э.М. Браверман [5], реализовав вариационный подход для конкретного критерия качества классификации (4). Эта работа была далее обобщена на существенно более широкий класс функционалов Е.В. Бауманом и А.А. Дорофеюком [9].

1.4. Размытая автоматическая классификация

Начиная с работы [8], задачи автоматической классификации в общей постановке исследуются для случая размытой классификации, когда вместо характеристических функций классов вводятся функции принадлежности к классу. Другими словами, размытая классификация задается r -мерной вектор-функцией $H(x) = (h_1(x), \dots, h_r(x))$, где $h_i(x)$ — функция принадлежности x к i -му классу. Функция $H(x)$ удовлетворяет следующим условиям: $H(\cdot) \in L_2(X, P)$, и для любого x значение $H(x)$ принадлежит некоторому ограниченному множеству V пространства значений вектор-функции $H(x)$, т. е. $H(x) \in V \subseteq R^k$. Путем выбора ограничивающего множества V можно получить различные типы размытости, а именно — чёткую классификацию, размытую классификацию и классификацию с размытыми границами.

В работе [8] был рассмотрен критерий качества классификации достаточно общего вида:

$$\Phi = \Phi_2(\mu(H)), \quad (5)$$

где Φ — выпуклый функционал, $\mu(H) = (p_i, M_i; i = 1, \dots, r)$. Значительная часть известных критериев качества классификации точек евклидова пространства является частным случаем функционала (5). В работе [8] предложен алгоритм максимизации критерия (5), доказана его сходимость к стационарному значению для случая строго выпуклого, дважды непрерывно дифференцируемого функционала (5).

В последующем был рассмотрен ещё более широкий класс критериев качества классификации — произвольный выпуклый функционал $\Phi_3 = \Phi_3(H)$

от вектор-функции $H(x)$. Было показано, что к этому классу относится не только подавляющее большинство известных критериев качества классификации (в том числе функционалы в неметрических шкалах), но и широкий класс функционалов, используемых в других задачах анализа данных (кусочная аппроксимация сложных зависимостей, экстремальная группировка параметров, диагонализация матрицы связи и др.). С этого времени область применения методов автоматической классификации расширилась настолько, что появилось новое направление, получившее весьма общее название «анализ данных». Это направление, в отличие от традиционных статистических методов, требующих для своего применения некоторой вероятностной модели (построение которой достаточно трудная, а иногда и принципиально неразрешимая задача) предназначено для «разведочного» анализа многомерных массивов сложноорганизованных данных [10]. Соответствующие алгоритмы стали называться алгоритмами классификационного (структурно-классификационного) анализа данных.

Для исследования вида оптимальной размытой классификации важно понятие *опорной размытой классификации* $H_r(x)$ для произвольного линейного функционала $F(H)$: $H_r(x) = \arg \max_{H \in V} (F(x), H)$.

Доказана теорема о том, что оптимальная размытая классификация принадлежит классу опорных классификаций.

Этот результат позволяет построить итерационный алгоритм максимизации функционала $\Phi = \Phi_3$. Основу алгоритма составляют два правила: правило нахождения опорной классификации по данному линейному функционалу $F(H)$ и правило нахождения по результатам классификации такого функционала, который был бы субградиентом исходного функционала [10]. Доказана теорема о сходимости этого алгоритма.

1.4.1. Размытая классификация с фоновым классом

Во многих задачах классификационного анализа приходится классифицировать объекты одинаково далёкие от всех классов, например, при грубых ошибках наблюдений или при неправильно выбранном числе классов (заниженном по отношению к истинному). Был введён в рассмотрение специальный класс, в пределах которого не учитывается близость объектов друг к другу, который был назван фоновым [10]. При наличии фонового класса размытая классификация задается вектор-функцией $H(x) = (h_0(x), h_1(x), \dots, h_r(x))$, где $h_0(x)$ — функция принадлежности x к фоновому классу. При исследовании размытой классифика-



ции с фоновым классом в дополнение к уже рассмотренным выше трём типам размытости появляются ещё дополнительные варианты, например, размытая классификация с чётким фоновым классом.

2. СТРУКТУРИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

При решении задач автоматической классификации объектов достаточно часто возникала проблема размерности пространства параметров X и выбора набора информативных (в смысле получения качественной классификации) параметров. Именно тогда возникла задача структуризации параметров. Формально задача ставится как задача нахождения такой классификации (группировки) параметров и таких эталонов классов (в этой задаче они называются факторами), обеспечивающих экстремальное значение некоторого заданного критерия качества такой группировки, имеющего интуитивно понятный содержательный смысл. В работе [11] была поставлена задача *экстремальной группировки параметров*, которая, в определённом смысле, является обобщением задачи факторного анализа. Были разработаны и теоретически изучены два алгоритма экстремальной группировки параметров, отличающиеся видом критерия качества группировки [11]. В обоих критериях в качестве меры связи (или «близости») параметров используется коэффициент корреляции (ковариации). Как эти алгоритмы, так и их многочисленные модификации широко применяются до сих пор, как независимо — в задачах анализа структуры конкретных наборов параметров, так и в составе программно-алгоритмических комплексов, предназначенных для решения крупномасштабных задач структурного анализа больших массивов сложнорганизованных данных [4, 12].

Одна из важнейших задач структурно-классификационного анализа — задача выделения (иногда — построения) так называемых «информативных» параметров. Дело в том, что практически все алгоритмы структуризации достаточно чувствительны к присутствию в исходном наборе «шумящих» или «малоинформативных» параметров, т. е. параметров слабо связанных с основными характеристиками исследуемой системы (по сравнению с другими, «информативными» параметрами). Наличие таких параметров приводит к «размыванию» исследуемой структуры, а при их значимом числе — к серьёзному её искажению.

Алгоритмы экстремальной группировки параметров дают хороший инструмент получения набора информативных параметров. А именно, в качестве информативных предлагается выбирать либо синтетические параметры — факторы, которые являются аналогами центров классов в задаче

классификации объектов, либо по 1—2 параметра из каждой группы, ближайших к соответствующему фактору [4].

Несколько особняком стоит задача структуризации номинальных признаков, которая стала весьма актуальной в последнее время в связи с решением прикладных задач структуризации для крупномасштабных слабо формализованных систем управления [13]. В таких задачах приходится рассматривать десятки, а иногда и сотни классификаций объектов, входящих в исследуемую систему (для различных — пространств признаков, видов выбранной метрики в этом пространстве, значений свободных параметров применяемого алгоритма, различных типов алгоритмов и т. д.). Задача исследования такого множества классификаций, как правило, неподъёмная для эксперта-прикладника. Учитывая, что каждая классификация — это n -позиционный, r -градационный номинальный признак (n — число объектов, r — число классов), то задача структуризации множества классификаций эквивалентна задаче структуризации соответствующих номинальных признаков [14].

Интересные результаты получены в задаче структуризации параметров долевого типа, широко используемых в демографии, медицинской статистике, социологии, при обработке результатов переписи населения и др. [15].

3. МЕТОДЫ СТРУКТУРНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СЛОЖНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

В конце 1960-х гг. интенсивно велись работы по применению разработанных алгоритмов автоматической классификации для решения целого ряда прикладных задач. В процессе решения некоторых из них появились новые постановки задач структурного анализа данных. Самой интересной как с теоретической, так и с прикладной точки зрения оказалась задача *кусочной аппроксимации сложных зависимостей*. Исторически она вначале формулировалась как задача идентификации статической характеристики некоторого технологического объекта (процесса), функционирующего в нескольких режимах. Дадим более подробно содержательную постановку этой задачи.

Рассмотрим технологический объект, состояние которого достаточно точно описывается вектором значений контролируемых входных параметров $x = \{x^{(1)}, \dots, x^{(k)}\}$, $x \in X$, где X — пространство входных параметров. Эффективность работы объекта определяется значениями выходного параметра y . Необходимо идентифицировать статическую характеристику объекта, другими словами, моделью объекта служит функциональный преобразователь $y = F(x)$, где $F(x)$ — неизвестная функ-



ция. Обычно для такой идентификации по известным значениям векторов входных параметров x_1, \dots, x_n и соответствующих значений выходного параметра y_1, \dots, y_n строится аппроксимация

$y = \tilde{F}(x)$, для которой заданный критерий качества аппроксимации J принимает экстремальное значение. Обычно таким критерием служит остаточная дисперсия y относительно аппроксимирующей функции $\tilde{F}(x)$, т. е. функционал вида

$$J = \int_X [y - \tilde{F}(x)]^2 dP(x). \quad (6)$$

Существует ряд методов решения этой задачи — метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия, классические алгоритмы регрессионного и корреляционного анализа, процедуры типа стохастической аппроксимации и др. Все эти методы предполагают априорный выбор класса аппроксимирующих функций $\tilde{F}(x, \alpha)$, который обычно задаётся параметрически — с помощью векторного параметра α .

В практических задачах объем имеющегося статистического материала жёстко ограничивает число оцениваемых параметров в смысле статистической достоверности получаемых результатов. А это означает, что для сложных функций $\tilde{F}(x, \alpha)$ требуется оценивать слишком большое число параметров, что невозможно на ограниченном материале. Однако в процессе анализа реальных объектов было замечено, что во многих случаях статическая характеристика, хотя и является сложной функцией во всей допустимой области изменения вектора входных параметров, но может быть представлена как совокупность достаточно простых функций $F_j(x)$ в пределах отдельных областей B_j пространства входов X , соответствующих различным режимам функционирования объекта. Другими словами, статическая характеристика сложного вида может быть представлена как совокупность достаточно простых «кусков».

Это означает, что аппроксимируемая функция $y = F(x)$ может быть представлена в виде $y = \sum_{j=1}^r h_j(x)F_j(x)$, где $h_j(x)$ — функции принадлежности x областям B_j , на которые разбивается пространство X (или область определения функции $F(x)$). Как уже говорилось в п. 1.4, вид $h_j(x)$ определяется выбранным типом размытости.

Аналогично определяется вид аппроксимирующей функции

$$\tilde{F}(x, \alpha) = \sum_{j=1}^r h_j(x) \tilde{F}_j(x, \alpha). \quad (7)$$

В этом случае функционал (6) имеет вид

$$J = \sum_{j=1}^r \int_X h_j(x) [y - \tilde{F}_j(x, \alpha)]^2 dP(x). \quad (8)$$

Для нахождения по статистическим данным аппроксимирующей функции (7), минимизирующей значение функционала (8), были разработаны специальные *методы кусочной аппроксимации*, существенно использующие алгоритмы автоматической классификации. Первые публикации на эту тему касались задач контроля качества сложных изделий (кусочно-постоянная или ступенчатая аппроксимация) [16] и идентификации статической характеристики промышленного объекта (кусочно-линейная и кусочно-полиномиальная аппроксимация) [17]. Исчерпывающее описание алгоритмов решения последней задачи содержится в брошюре [18].

Алгоритмы кусочной аппроксимации можно условно разделить на одноэтапные и двухэтапные. В одноэтапных алгоритмах поиск оптимального в смысле критерия (8) разбиения $\{B_j\}$, $j = 1 \div r$, и соответствующих локальных аппроксимаций $\tilde{F}_j(x, \alpha)$, $j = 1 \div r$, производится одновременно. В двухэтапных — предполагается, что область значений входных параметров в пространстве X , соответствующих одному и тому же режиму функционирования объекта, является достаточно компактным кластером. Поэтому вначале производится автоматическая классификация выборочных значений входных параметров, которая порождает разбиение пространства X на области B_j , соответствующие различным режимам функционирования объекта. На втором этапе для этого разбиения находят оптимальные локальные регрессии $\tilde{F}_j(x, \alpha)$, $j = 1 \div r$.

Наибольший интерес в смысле приложений представляют рекуррентные алгоритмы кусочной аппроксимации, поскольку они позволяют проводить идентификацию объекта в реальном времени (в режиме нормальной эксплуатации). Кроме того, на базе рекуррентных алгоритмов достаточно просто реализовать адаптивные схемы идентификации, позволяющие отслеживать медленные изменения статической характеристики объекта (например, в нефтехимии это происходит из-за старения катализатора). Такие алгоритмы были разработаны на базе вариационного подхода [18]. Однако теоретический анализ сходимости таких алгоритмов сопряжён с существенными трудностями, которые удалось преодолеть только после доказательства того, что задача кусочно-линейной аппроксимации является частным случаем задачи автоматической классификации [19]. Впослед-



ствии были разработаны оптимальные алгоритмы кусочно-линейной аппроксимации [20].

Для задач кусочной аппроксимации была предложена оригинальная иерархическая схема одновременного поиска наборов информативных переменных и локальных аппроксимаций, названная методом *иерархической кусочной аппроксимации* [21]. Идея этого метода состоит в следующем. Разбиение пространства входов X на области B_j подразумевает, что эти области соответствуют различным режимам функционирования объекта. А это, в свою очередь, может означать, что для каждого режима может быть свой набор информативных входных переменных. Другими словами, в таком анизотропном случае информативные переменные необходимо искать для каждой области B_j независимо. Подобное рассуждение справедливо не только для всего пространства X , но и для каждой области B_j (каждый режим функционирования объекта может распадаться на подрежимы) и т. д.

В процессе решения прикладных задач, связанных с аппроксимацией сложных зависимостей, было замечено, что для многих объектов в промышленности, экономике, геологии и других областях искомая зависимость $y = F(x)$ имеет следующую структуру: на фоне некоторой, как правило простой, зависимости $y = f(x)$ (основная закономерность, тренд, тенденция и т. д.) в отдельных (аномальных) областях B_j^* пространства X (но не обязательно во всех) наблюдаются существенные отклонения от $f(x)$. Другими словами, искомую функцию $F(x)$ в таких случаях целесообразно представлять как композицию двух функций — глобальной составляющей $f(x)$ и локальных функций отклонения от неё $F_j^*(x)$ в аномальных областях B_j^* . В этом случае аппроксимирующую функцию $\tilde{F}(x)$ следует искать в виде: $\tilde{F}(x, \alpha) = f(x, \alpha) + \sum_{j=1}^r \varepsilon_j^*(x) \tilde{F}_j^*(x, \alpha)$, где $\varepsilon_j^*(x)$ — характе-

ристическая функция аномальной области B_j^* (принимает значение 1 только для точек этой области). Задача нахождения такой функции была названа *задачей комбинированной кусочной аппроксимации*, были разработаны алгоритмы решения этой задачи, существенно использующие процедуры кусочно-линейной аппроксимации [22].

Отметим ещё один интересный алгоритм кусочно-линейной аппроксимации второго типа, в котором при построении аппроксимации анализируется не только близость областей B_j , но и, в определённом смысле, близость локальных рег-

рессий $\tilde{F}_j(x, \alpha_j)$ в этих областях [23]. Идея этого алгоритма состоит в следующем. Вначале по выборочным значениям входных параметров с помощью одного из алгоритмов автоматической классификации пространства X разбивается на $r_{\text{нач}}$ областей, где $r_{\text{нач}} \gg r$ (r — экспертная оценка, вообще говоря, неизвестного числа различных режимов работы исследуемого объекта). Единственное ограничение на $r_{\text{нач}}$ — это возможность построения статистически значимой оценки локальной линейной регрессии $\tilde{F}_j(x, \alpha_j)$ для большинства областей. Области, для которых это невозможно сделать, объединяются, исходя из ранее введённой меры близости (3) между группами точек A_i и A_j , соответствующих областям B_i и B_j . Такое объединение продолжается до тех пор, пока в каждой области не будет построена статистически значимая оценка локальной регрессии $\tilde{F}_j(x, \alpha_j)$. На втором этапе полученные области объединяются с помощью следующего алгоритма. На каждом шаге ищутся ближайшие в смысле меры близости (3) области B_i и B_j , затем рассматривается гипотеза:

«аппроксимации локальных регрессий $\tilde{F}_i(x, \alpha_i)$ и $\tilde{F}_j(x, \alpha_j)$ статистически не различимы (эквивалентны)». Если гипотеза подтверждается, то области B_i и B_j объединяются, и для объединённой области B_{ij} строится аппроксимация локальной регрессии $\tilde{F}_{ij}(x, \alpha_{ij})$, в противном случае рассматривается следующая пара ближайших областей и т. д. Для проверки этой гипотезы в работе [23] используется статистика G. Чоу, для которой необходимо знать аппроксимации локальных регрессий $\tilde{F}_i(x, \alpha_i)$, $\tilde{F}_j(x, \alpha_j)$ и $\tilde{F}_{ij}(x, \alpha_{ij})$, а также выбрать уровень значимости F_0 . Важная особенность описанного алгоритма — автоматическое определение числа r областей B_j , причём в определённом смысле оптимальным образом.

4. МЕТОДЫ СТРУКТУРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Многие крупномасштабные системы управления, в первую очередь — организационно-административные, функционируют в условиях большой информационной размытости и неопределённости. Именно поэтому в последнее время для исследования таких систем стали широко применяться не только методы структурного анализа данных, но и *методы структурного прогнозирования*, основу которых составляют процедуры клас-



сификационного анализа. Основная идея методов структурного прогнозирования состоит в том, что исследуются не точные значения параметров, описывающих состояние каждого объекта (например, траектории состояний), а лишь класс, к которому принадлежит каждый объект в рамках некоторой структуры (классификации) множества объектов, входящих в исследуемую систему [24]. Такое интегральное описание объектов позволяет существенно повысить эффективность анализа поведения системы, а также устойчивость и робастность процедур принятия управленческих решений и прогнозов.

Опишем вкратце общую схему работы одного из алгоритмов структурного прогнозирования [25]. Пусть исследуемая система состоит из n объектов, каждый из которых характеризуется набором из k параметров, измеряемых в дискретные моменты времени. В k -мерном пространстве параметров X j -ый объект в момент времени t представляется точкой $x_j(t) = \{x_j^{(1)}(t), x_j^{(2)}(t), \dots, x_j^{(k)}(t)\}$. Упорядоченная совокупность точек $x_j(t_1), \dots, x_j(t_m)$ является известной частью траектории, характеризующей динамику j -го объекта. Как уже говорилось, для многих прикладных задач для j -го объекта требуется прогнозировать не точные значения параметров-характеристик $x_j(t)$ в момент времени t_{m+1} , а лишь класс, к которому будет принадлежать объект в этот момент времени в рамках некоторой структуры (классификации) множества объектов изучаемой системы. Таким образом, основу предложенного алгоритма составляет процедура выявления структуры объектов, входящих в исследуемую систему. Для этой цели в работе [25] применяется комплексный алгоритм автоматической классификации, специально разработанный для решения таких задач [4]. С его помощью в момент времени t_1 производится структуризация n точек в пространстве X на r классов, каждый из которых и характеризует определённый тип объекта. Число классов r выбирается с помощью человеко-машинной процедуры, входящей в комплексный алгоритм [4]. Вводится понятие модели (эталона) класса $a_i(t)$, $i = 1, \dots, r$, (обычно это центр класса) [10]. Для каждого объекта вычисляются расстояния до эталонов $R_{ij}(t)$, $i = 1, \dots, r, j = 1, \dots, n$.

В момент времени t_2 каждая точка $x_j(t_2)$ с помощью одного из алгоритмов распознавания образов с учителем относится к тому или иному классу в рамках классификации, полученной на первом шаге. В работе [25] для этого применяется алгоритм метода потенциальных функций, который в спрямляющем пространстве эквивалентен алгоритму ближайшего среднего [26]. После этого производится пересчёт эталонов $a_i(t_2)$, $i = 1, \dots, r$, а

также пересчёт (для точек $x_j(t_1)$) или подсчёт (для точек $x_j(t_2)$) расстояний $R(x_j(t_2), a_i(t_2))$ до новых эталонов $i = 1, \dots, r, j = 1, \dots, n$. Такая процедура выполняется для всех m моментов времени. В итоге для каждого объекта получается последовательность (траектория) из m позиций. В каждой позиции находится $r + 1$ число, первое из которых — это номер класса, к которому относился этот объект в соответствующий момент времени, а последующие числа — это значения расстояний до центров классов в тот же момент времени. Требуется спрогнозировать номер класса (тип объекта), к которому будет относиться каждый объект в момент времени t_{m+1} .

В качестве прогнозной модели для каждого объекта используется марковская цепь с r состояниями, т. е. на каждом шаге рассчитываются элементы матрицы переходных вероятностей $P = \|p_{ji}\|$, $j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, r$. В работе [25] разработан специальный алгоритм пересчёта на каждом шаге соответствующих переходных вероятностей p_{ji} с использованием информации о значениях расстояний до центров классов и условия нормировки

$$\sum_{i=1}^r p_{ji} = 1 \text{ для всех } j = 1, \dots, n. \text{ Построенная матрица переходных вероятностей используется для прогнозирования принадлежности объекта тому или иному классу. На практике обычно применяется не рандомизированная, а байесовская схема, когда объект относится к тому классу } i_0, \text{ для которого } p_{ji_0} = \max_{i=1, \dots, r} p_{ji}.$$

Возможны различные модификации описанной выше схемы [25]: классификация объектов задаётся заранее (например, экспертным путём) и в последующем остаётся неизменной; используются данные только об s прошлых состояниях множества объектов (алгоритм с «памятью», s — глубина памяти); для структуризации применяются алгоритмы размытой классификации, в том числе с фоновым классом [10].

5. ЭКСПЕРТНЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Экспертные методы применялись в задачах структурного анализа достаточно давно, в большинстве своём при выборе свободных параметров алгоритмов структуризации (см., например, обзор [2]). Затем появились специальные корректирующие экспертные процедуры в алгоритмах выбора «оптимального» числа классов, выбора информативных параметров, заполнения пропущенных наблюдений [4], построения хорошо интерпретируемых классификаций [27]. Но наибольшее распространение экспертные методы получили при



решении задач исследования слабо формализованных социально-экономических и организационных систем управления [28].

Наиболее востребованными оказалась *коллективная бесконфликтная многовариантная экспертиза*, впервые предложенная в работе [29], концепция которой базируется на следующих основных принципах [28]:

— экспертиза проводится в экспертных комиссиях, число которых не меньше числа различных точек зрения на исследуемую проблему;

— в одну и ту же комиссию должны включаться эксперты, имеющие близкие точки зрения на исследуемую проблему;

— в каждой комиссии могут работать только эксперты, не имеющие конфликтных взаимоотношений;

— для коллективной экспертизы отбираются условно компетентные эксперты (те, которые считаются компетентными для экспертов из одной и той же комиссии);

— организация и проведение экспертизы, обработка экспертных оценок, формирование результатов экспертизы должны проводиться специальной консалтинговой группой, приглашённой, для большей объективности, со стороны, независимой и незаинтересованной в результатах экспертизы.

Концепция была реализована в рамках специальной методики формирования экспертных комиссий [28]. Методика состоит из пяти основных разделов (этапов): выявление кандидатов для работы в экспертных комиссиях; выявление существенно различных точек зрения; определение групп неконфликтующих экспертов; оценка условной компетентности экспертов; формирование экспертных комиссий. Были разработаны также варианты *структурной, структурно-иерархической и заочной многовариантной экспертизы*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы структурно-классификационного анализа сложноорганизованных данных широко применяются для решения разнообразных прикладных задач. Достаточно обширный набор примеров решения таких задач содержится в работах [2, 4, 7, 18, 22, 23, 25, 26, 28, 30]. К ним надо добавить работы по медицинской диагностике и анализу медицинской информации с применением структурно-классификационных алгоритмов, например, [31, 32]; решению естественнонаучных задач, например, [33]; проектированию профессиональных и образовательных стандартов, например, [34]; созданию процедур оценки эффективности функционирования крупномасштабных организационно-административных систем, например, [35].

В ближайшей перспективе центр тяжести исследований в этой области будет перемещаться в сторону создания оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов структуризации большой и сверхбольшой размерности для разнородных параметров, при существенных пропусках в исходной информации, значимом уровне помех (в том числе целенаправленного свойства), которые значительно больше будут ориентированы на экспертную информацию, в том числе: при выборе общей стратегии и конкретного набора процедур обработки, для выбора свободных (настраиваемых) параметров, содержательной интерпретации и коррекции получаемых результатов. В прикладных работах основное внимание будет уделяться крупномасштабным, слабо формализованным объектам (финансовые, социально-экономические и организационно-административные системы) и комплексам взаимосвязанных технологических процессов (в машиностроении; приборостроении, в том числе медицинском; химии, нефтехимии и нефтепереработке; в производстве современного вооружения и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеюк А.А., Мучник И.Б. Работа М.А. Айзермана в области распознавания образов и анализа данных / В кн.: «Марк Аронович Айзерман 1913 — 1992». — М.: Физматлит, 2002. — С. 115—159.
2. Дорофеюк А.А. Алгоритмы автоматической классификации // Автоматика и телемеханика. — 1971. — № 12.
3. Дорофеюк А.А. Алгоритмы обучения машины распознаванию образов без учителя, основанные на методе потенциальных функций // Автоматика и телемеханика. — 1966. — № 10.
4. Дорофеюк Ю.А. Комплексный алгоритм автоматической классификации и его использование в задачах анализа и принятия решений // Таврический вестник информатики и математики. — 2008. — № 1. — С. 171—177.
5. Браверман Э.М. Метод потенциальных функций в задаче обучения машины распознаванию образов без учителя // Автоматика и телемеханика. — 1966. — № 10.
6. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциальных функций в теории обучения машин. — М.: Наука, 1970.
7. Дорофеюк А.А. Алгоритмы автоматической классификации, основанные на методе потенциальных функций, и их практическое использование // Вопросы технической кибернетики. — М.: Наука, 1968.
8. Бауман Е.В., Дорофеюк А.А. Рекуррентные алгоритмы автоматической классификации // Автоматика и телемеханика. — 1982. — № 3.
9. Бауман Е.В., Дорофеюк А.А. Вариационный подход к задаче автоматической классификации для одного класса аддитивных функционалов // Автоматика и телемеханика. — 1978. — № 8.
10. Бауман Е.В., Дорофеюк А.А. Классификационный анализ данных // Избранные труды Междунар. конф. по проблемам управления. — М.: СИНТЕГ, 1999. — Т. 1.
11. Браверман, Э.М. Методы экстремальной группировки параметров и задача выявления существенных факторов // Автоматика и телемеханика. — 1970. — № 1.



12. Программно-алгоритмический комплекс структурно-классификационного анализа сложноорганизованных данных / Е.В. Бауман, А.А. Дорофеюк, Ю.А. Дорофеюк, Н.Е. Киселёва // Таврический вестник информатики и математики. — 2008. — № 1. — С. 66—72.
13. Дорофеюк А.А., Гольдовская М.Д., Покровская И.В. Когнитивные методы структурного анализа в задаче оценки эффективности слабо формализованных региональных систем // Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций / Тр. VII Междунар. конф. — М.: ИПУ, 2007. — С. 33—36.
14. Бауман Е.В., Москаленко Н.Е. Структуризация результатов размытого кластер-анализа // Искусственный интеллект. — 2004. — № 2. — С. 355—359.
15. Бауман Е.В., Москаленко Н.Е. Методы экстремальной группировки параметров долевого типа // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 11. — С. 133—142.
16. Дорофеюк А.А., Торговицкий И.Ш. Применение методов автоматической классификации данных в задаче контроля качества изделий // Стандарты и качество. — 1967. — № 4.
17. Дорофеюк А.А., Касавин А.Д., Торговицкий И.Ш. Применение методов автоматической классификации для построения статической модели объекта / Автоматика и телемеханика. — 1970. — № 2.
18. Райбман Н.С., Дорофеюк А.А., Касавин А.Д. Идентификация технологических объектов методами кусочной аппроксимации. — М.: Институт проблем управления, 1977. — 70 с.
19. Бауман Е.В. Сведение задачи кусочно-линейной аппроксимации к задаче автоматической классификации // Моделирование и оптимизация сложных систем управления. — М.: Наука, 1981.
20. Бауман Е.В., Дорофеюк А.А., Корнилов Г.В. Алгоритмы оптимальной кусочно-линейной аппроксимации сложных зависимостей // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 10. — С. 163—171.
21. Dorofeyuk A., Kasavin A. Hierarchical piecewise approximation method in identification of complex plants // Identification and System Parameter Estimation. Part 3. — Amsterdam: North-Holland PC. 1978. — P. 1727—1736.
22. Алиев С.А., Дорофеюк А.А., Мовсумов В.Г. Методы комбинированной кусочной аппроксимации и их приложения // Анализ данных и экспертные оценки в организационных системах. — М.: ИПУ, 1985. — С. 45—50.
23. Дорофеюк А.А., Ибрагимли Ш.Д., Мовсумов В.Г. Использование критерия статистической эквивалентности моделей в задаче кусочной аппроксимации // Автоматика и телемеханика. — 1976. — № 7. — С. 109—113.
24. Дорофеюк А.А., Дорофеюк Ю.А. Методы структурно-классификационного прогнозирования многомерных динамических объектов // Искусственный интеллект. — 2006. — № 2. — С. 138—141.
25. Дорофеюк Ю.А. Структурно-классификационные методы анализа и прогнозирования в крупномасштабных системах управления // Проблемы управления. — 2008. — № 4. — С. 78—83.
26. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. — М.: Наука, 1983.
27. Дорофеюк А.А., Чернявский А.Л. Алгоритмы построения хорошо интерпретируемых классификаций // Проблемы управления. — 2007. — № 2. — С. 83—84.
28. Дорофеюк А.А., Покровская И.В., Чернявский А.Л. Экспертные методы анализа и совершенствования систем управления // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 10. — С. 172—188.
29. Дорофеюк А.А. Методы автоматической классификации в задачах получения экспертной информации // Статистика. Вероятность. Экономика. Учёные записки по статистике. — М.: Наука, 1985. — Т. 49. — С. 137—145.
30. Дорофеюк А.А., Покровская И.В., Шипилов Ю.В. Процедуры структурно-классификационной экспертизы и их практическое использование // Третья Междунар. конф. по проблемам управления. Пленарные доклады и избранные труды. — М.: ИПУ, 2006. — С. 372—375.
31. Классификационный анализ характеристик пульсового сигнала в задачах диагностики сердечно-сосудистых заболеваний / А.А. Дорофеюк, В.В. Гучук, А.А. Десова и др. // Таврический вестник информатики и математики. — 2008. — № 1. — С. 152—158.
32. Дорофеюк А.А., Дмитриев А.Г. Методы кусочной аппроксимации многомерных кривых // Автоматика и телемеханика. — 1984. — № 12.
33. Браверман Э.М., Дорофеюк А.А., Лумельский В.Я. Применение методов распознавания образов без учителя в естественнонаучных исследованиях // Адаптивные системы. Распознавание образов. Тр. Междунар. симпозиума ИФАК по техническим и биологическим аспектам управления, Ереван, 1968. — М.: Наука, 1971.
34. Классификация объектов профессиональной деятельности специалиста при проектировании профессиональных и образовательных стандартов / В.В. Никитин, С.В. Мальцева, А.А. Дорофеюк и др. // Проблемы управления. — 2007. — № 4. — С. 51—55.
35. Лифшиц Д.В., Дорофеюк Ю.А. Методология оценки эффективности управления жилищно-коммунальным хозяйством крупного города на базе экспертно-классификационных методов анализа и моделирования ситуаций // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2008). Материалы второй междунар. конф. — М.: ИПУ РАН, 2008. — Т. I. — С. 63—66.



Дорофеюк Александр Александрович — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией обработки больших массивов информации в иерархических системах. Председатель секции «Управление социально-экономическими, медико-биологическими и организационными структурами» Учёного совета ИПУ, член Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации, член НТС Минтранса МО, член Экспертного совета Фонда «Социальное развитие» при Правительстве РФ, член Экспертного совета РФФИ, член редколлегии журнала «Проблемы управления». Опубликовал более 200 научных трудов, в том числе 14 монографий. Под его руководством защищено 16 кандидатских и 3 докторские диссертации. Основные научные интересы — структурно-классификационный анализ сложноорганизованных данных; коллективная многовариантная экспертиза; системные методы поддержки принятия решений в слабо формализованных системах управления; методы анализа, совершенствования и прогнозирования в социально-экономических и организационных системах управления.

☎ (495) 334-75-40, ✉ adorof@ipu.ru.

УДК 519.714.3

ТЕОРИЯ АКТИВНЫХ СИСТЕМ

(история развития и современное состояние)

В.Н. Бурков, Д.А. Новиков

Описано становление, развитие и современное состояние теории активных систем — раздела теории управления, отличительная черта которого состоит в учете человеческого фактора. Приведены основные результаты и отмечены научные коллективы, внесшие весомый вклад в развитие теории.

Ключевые слова: активные системы, механизмы управления составом и структурой системы, институциональное, мотивационное, информационное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Наука управления развивается естественным путем развития любой науки — от простого к сложному, от простых регуляторов до сложных систем управления производством, космическими кораблями и др.

К концу 1960-х гг. наука управления вплотную подошла к, пожалуй, самой сложной задаче — задаче управления человеком, коллективом, обществом. Дело в том, что человек в отличие от любой самой сложной технической системы обладает свойствами активности, т. е. имеет собственные цели, дальновиден, для достижения своих целей способен исказить информацию, передаваемую органу управления (способен обманывать), а также способен сознательно не выполнять предписанных заданий (планов). Задача управления такими активными объектами и составляет существо теории активных систем.

В настоящей статье кратко описаны этапы становления и развития теории (см. также обзор¹ [1]), перечислены основные результаты и отмечены ведущие научные коллективы, внесшие весомый вклад в ее развитие.

¹ Отбирая источники для списка литературы, авторы стремились ссылаться, в первую очередь, на ключевые книги и брошюры, которые находятся в свободном доступе в Интернете.

1. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ (1970—1980-е гг.)

Начало теории активных систем относится к 1969 году, когда сотрудником ИАТа В.Н. Бурковым было введено понятие «активный элемент», т. е. объект управления, обладающий свойствами активности (наличием своих интересов, способностью сознательно сообщать недостоверную информацию и не выполнять назначенные планы).

Для управления системами с активными элементами (активными системами) был предложен принцип открытого управления. Его суть состоит в следующем. Пусть имеется организационная система из элементов со своими интересами. Интересы системы в целом выражает Центр, который вырабатывает управляющие воздействия (планы) для элементов. Если Центр решает задачу выбора оптимального плана, исходя из интересов системы в целом, то этот план, в общем случае, не будет оптимальным для элементов. Отстаивая свои интересы, элементы будут искажать информацию, представляемую Центру. Чтобы избежать этого, Центр должен назначать элементам выгодные для них планы, даже в ущерб интересам системы. Таким образом, Центр должен решать задачу оптимизации на множестве так называемых совершенно согласованных планов, т. е. планов, оптимальных для элементов. Ясно, что в этом случае элементам выгодно представлять в Центр досто-



верную информацию. Это и была первая формулировка принципа открытого управления [2, 3].

Примерно в это же время в начале 1970-х гг. в Вычислительном центре АН СССР под руководством Никиты Николаевича Моисеева и Юрия Борисовича Гермейера развернулись исследования по созданию информационной теории иерархических систем на основе теории игр с непротивоположными интересами [4].

Сначала было неясно, какие из постановок задач — задач информационной теории иерархических систем (игры Γ_1 , Γ_2 и др.) или задач синтеза механизмов функционирования в теории активных систем — являются более общими. Однако доказательство эквивалентности постановок этих задач прекратило споры на эту тему [5].

Период бурного развития теории с середины 1970-х до конца 1980-х гг., как в направлении углубления теоретических исследований, так и расширения практических приложений, связан с двумя факторами. Первый — это приход в руководимую В.Н. Бурковым лабораторию сначала в качестве студентов, а затем сотрудников, выпускников Московского физико-технического института — Вячеслава Кондратьева, Александра Щепкина, несколько позднее — Анвера Еналеева, Валерия Опойцева, Александра Цветкова, Сергея Андреева, Владимира Цыганова. Второй — это расширение связей с другими научными центрами — в Грузии, Казахстане, Литве, Украине, Узбекистане, Белоруссии, Новокузнецке, Ленинграде (Санкт-Петербурге), Куйбышеве (Самаре), Калинин (Твери), а также с ведущими отраслями (приборостроением, радиопромышленностью черной и цветной металлургией, промышленностью средств связи и др.).

Нет возможности перечислить весь коллектив единомышленников, названный позднее образно «Большой лабораторией активных систем». Остановимся на основных направлениях и «ключевых фигурах». Наибольшее развитие в теории за этот период получил принцип согласованного планирования, суть которого в назначении элементам только таких планов, которые им выгодно выполнять (согласованных планов) [5]. Оказалось, что во многих практически важных случаях оптимальный механизм должен быть механизмом согласованного планирования. Классическим и первым в этом направлении стал результат Анвера Еналеева. Он доказал, что если функции штрафа удовлетворяют «неравенству треугольника», то оптимальный механизм существует на множестве механизмов согласованного планирования. Более того, поскольку множество согласованных планов увеличивается с ростом «силы штрафов» за невыполнение

плана, то оптимальной системой стимулирования является система с максимальными штрафами (максимальной степенью централизации) [5, 6]. Разработка методов решения задач согласованной оптимизации и внедрение первых систем согласованного планирования на предприятиях — несомненная заслуга Казахской школы теории активных систем под руководством академика А.А. Ашимова (Борис Джапаров, Насанбадряден Кулжабаев, Калиоскар Сагынғалиев, Берик Уандыков, Жанбек Шанкитбаев и многие другие) [7].

Дальнейшее развитие методы согласованного планирования получили в работах Виктора Засканова, Геннадия Гришанова и их учеников (Самара) [8], Владимира Кузнецова (Тверь), Грузинской группы под руководством Ивана Горгидзе [9].

Другое крупное направление связано с Новокузнецкой школой профессора Виталия Авдеева и его сотрудников (Тамарой Киселевой, Станислава Кулакова и др.). Разработка теории многоканальных активных систем (многовариантных активных систем — по современной терминологии) и внедрение на предприятиях черной металлургии автоматизированных систем «советчик оператора», реализующих принцип многоканального управления [10] — несомненно заслуга профессора В.П. Авдеева и его учеников (премия Совета Министров СССР и Государственная премия СССР за эти работы говорят сами за себя). Незаурядный, сильный человек, талантливый ученый, Виталий Павлович был большим энтузиастом теории активных систем.

Большая группа работ в 1980-е гг. связана с задачей распределения ресурсов. Широко распространенная на практике, достаточно простая по формулировке, эта задача стала классическим примером для проверки различных механизмов. Доказательство инвариантности широкого класса механизмов управления (Валерий Опойцев) [11], обоснование гипотезы слабого влияния (Вячеслав Кондратьев) [5], доказательство оптимальности механизмов честной игры — все это впервые было сделано для задачи распределения ресурсов [12]. В прикладном плане этой задачей занимался Станислав Фокин (Минск), Бахтияр Юсупов (Ташкент), Татьяна Нанева (София). Глубокое исследование механизмов распределения ресурсов выполнил Виктор Заруба (Харьков). Татьяна Нанева, аспирант нашего института в те годы, — связующее звено с Болгарской школой профессора Ивана Попчева (Б. Метев, И. Цветанов, И. Гуевски, Б. Ланев и др.). Ряд результатов совместных исследований нашли отражение в монографии [13].

Следующее направление, получившее развитие за этот период, связано с разработкой систем оценки деятельности и стимулирования, их внед-



рением в приборостроение и радиопромышленность. Эту работу возглавил Александр Черкашин вместе с молодыми сотрудниками лаборатории (Еленой Умрихиной, Светланой Рапацкой, Ириной Явчуновской, Александром Балабаевым и др.) Началась работа по созданию эффективных механизмов управления циклом «исследование — производство» (Владимир Цыганов). Активное участие в этих работах принимали работники научно-технического управления Минприбора Николай Гореликов, Валерий Зимоха, Алексей Толстых. В отрасли радиопромышленности развернулись работы по созданию типовой комплексной системы управления отраслевыми НИИ и КБ (комплексные системы высокой эффективности и качества работ) [14]. В их основе также лежала комплексная система оценки результатов деятельности подразделений [6].

Следующая группа работ связана с разработкой так называемых противозатратных механизмов ценообразования и налогообложения. Задача состояла в том, чтобы разработать механизмы, побуждающие даже монополиста снизить затраты и цены на свою продукцию. И такие механизмы были разработаны [13, 15]! Более того, они прошли практическую проверку. Дело в том, что к концу 1980-х гг. наука перешла на договорные цены. Это привело к существенному росту средств, получаемых научными институтами (и, соответственно, заработков). Госплан и Госкомитет по науке и технике СССР приняли решение провести двухгодичный эксперимент по отработке новых налоговых механизмов в науке, сдерживающих тенденцию роста стоимости работ. И вот два института (наш Институт проблем управления и Московский телевизионный институт) приняли решение включиться в эксперимент, предложив принципиально новый механизм налогообложения научных организаций. Благодаря поддержке руководства отраслей (Минприбора и Минпрома средств связи), нам удалось попасть в число участников эксперимента.

Два года мы жили в новых условиях. Эксперимент убедительно подтвердил теорию. Помнится, в последний день первого года эксперимента дирекция, плановый отдел и бухгалтерия нашего института решила проблему: как уменьшить стоимость уже выполненных работ (т. е. снизить их цену) на довольно значительную сумму, поскольку в противном случае мы должны были перечислить в виде налогов гораздо большую сумму.

К сожалению, этот уникальный эксперимент (не только в Союзе, но, наверное, и в мире) был забыт, когда началась перестройка.

Последнее, что отметим из этого периода, это ряд работ по прогрессивным механизмам обмена,

выполненных совместно с Акопом Мамаконовым и Михаилом Кацнельсоном [16]. Речь идет о разработке механизмов обмена ресурсами, побуждающих участников предъявлять к обмену весь ресурс. Эти работы получили продолжение уже в настоящее время [17, 18].

Параллельно с развитием теории активных систем развернулись работы по созданию средств экспериментального исследования механизмов управления на основе метода деловых игр. Возник новый класс деловых игр, получивших название «игры ИПУ» [19]. Первые игры такого типа были разработаны Александром Ивановским, Александрой Немцовой, Наталией Диновой, Александром Щепкиным. В дальнейшем это направление возглавил Александр Щепкин [20].

Громадную роль в развитии теории сыграли школы-семинары по большим системам. Инициатором первых школ выступил Иван Горгидзе, и первые школы были проведены в Тбилиси. Затем несколько школ в Алма-Ате, Литве (Нида, Малетай), снова Алма-Ата, Тбилиси. Каждая школа давала толчок развитию теории, ставила новые задачи, привлекала новых сторонников.

Подводя итог периода бурного развития и вширь, и вглубь, можно констатировать, что к началу 1990-х гг. теория активных систем накопила потенциал, достаточный для решения проблем повышения эффективности плановой экономики. Действительно, была разработана и экспериментально внедрена в Минприборе гибкая система комплексной оценки результатов деятельности предприятий, стимулирующая научно-технический прогресс, разработана теория противозатратных механизмов ценообразования и налогообложения и начался эксперимент ее проверки на двух научных организациях, внедрена система согласованного планирования и оперативного управления на целом ряде предприятий разных отраслей, разработаны и внедрены гибкие интегрированные системы высокой эффективности и качества работ в радиопромышленности, созданы эффективные автоматизированные системы типа «советчик оператора» в черной металлургии.

Нет возможности вдаваться в детали, но не меньший прогресс в разработке эффективных методов управления экономикой имел место и в других ведущих научных школах (ВЦ АН СССР, ВНИИСИ РАН, ЦЭМИ РАН и др.). На базе этого научного потенциала можно было найти другой путь решения социально-экономических проблем Советского Союза, не столь болезненный и разрушительный. Но, что случилось, то случилось. Началась перестройка.



2. ПЕРЕСТРОЕЧНЫЙ ПЕРИОД (1990-е гг.)

Нужно было переориентировать основные задачи на рыночную экономику (точнее, на экономику переходного периода). А для этого, в первую очередь, более детально изучить состояние зарубежных исследований в близких областях. Эту трудоемкую работу возглавил еще студентом, а затем сотрудником лаборатории молодой ученый Дмитрий Новиков вместе со столь же молодыми своими студентами, аспирантами и докторантами (Михаилом Губко, Михаилом Исаковым, Николаем Коргиным, Сергеем Мишиным, Александром Чхартишвили и др.). И работа была выполнена. В результате появился ряд обзоров, в которых результаты теории активных систем сопоставлялись с зарубежными результатами теории контрактов, теории реализуемости и других близких теорий. Вывод нас обнадежил — мы были на уровне (где-то отставали, но где-то были впереди) [21]. К слову сказать, Дмитрий Новиков уже в 27 лет стал доктором наук — самым молодым доктором в Институте, а в 38 лет — член-корреспондентом РАН.

Затем, нужно было найти новые точки приложения сил, прикладные задачи в новых экономических условиях. Одна из таких задач связана с проблемой реформирования и реструктуризации предприятий, от решения которой зависит будущее России. Объединение теории принятия решений в распределенных системах с теорией активных систем и создание на этой основе практических методик и технологий реформирования оказались крайне плодотворными [22, 23]. На уровне задач государственного регулирования Институт включился в Федеральную программу «Безопасность», где задача заключалась в разработке экономических механизмов обеспечения безопасности (экологической, от катастроф и чрезвычайных ситуаций) [24—26]. Появился и ряд других важных прикладных задач [1].

3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

За последнее десятилетие теория активных систем трансформировалась в более широкое направление — теорию управления организационными системами (ОС), включив в себя в том или ином смысле ряд подходов к управлению организациями — теорию активных систем, теорию иерархических игр [4], элементы системного анализа [27] и *mechanism design* (см. обзоры в книгах [28, 29]).

Традиционные задачи управления также получили свое развитие. Определенное завершение по-

лучила теория механизмов стимулирования, развиваемая под руководством Д.А. Новикова [8, 30]. Активно развиваются задачи многокритериального планирования (В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, М.Б. Исаков [31]). Ведутся исследования в области управления проектами (С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.В. Цветков [32—34]). Существенные результаты получены в области управления регионами и предприятиями в условиях рынка (В.А. Ириков, А.Ю. Заложнев, А.К. Еналеев [22, 35]); информационных войн и информационного менеджмента (В.В. Цыганов [36]); экономики инноваций, управления региональной экономикой и прогнозирования экономической динамики (Р.М. Нижегородцев [37—39]).

Значительные результаты, в первую очередь теоретические, получены молодыми учеными. В частности, сформировалась и интенсивно развивается теория оптимизации иерархических структур (Воронин А.А., Губко М.В., Мишин С.П. [40—43]). Получены интересные результаты в области теории игр — оформлена в виде отдельного направления теория рефлексивных игр (Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. [44, 45]), предложена новая концепция равновесия — равновесие в безопасных стратегиях (М.Б. Исаков [46]). Значительное внимание уделяется постановкам задач оптимизации и управления в распределенных, сетевых структурах (И.В. Буркова [47]).

В целом на сегодня складывается следующая картина. Управление ОС, понимаемое как воздействие на управляемую систему с целью обеспечения требуемого ее поведения, может затрагивать каждый из пяти параметров ее модели (состав, структура, ограничения и нормы деятельности, предпочтения и информированность). Поэтому выделяют [29]:

- управление составом [48, 49];
- управление структурой [40—43, 49, 50];
- институциональное управление (управление «допустимыми множествами» и нормами деятельности) [51];
- мотивационное управление [30, 21] (управление предпочтениями и интересами);
- информационное управление (управление информацией, которой обладают участники ОС на момент принятия решений) [52, 53, 44, 45];
- управление порядком функционирования (управление последовательностью получения информации и выбора стратегий участниками ОС) [50].

Обсудим кратко специфику различных типов управлений.

Управление составом касается таких вопросов; как кто войдет организацию, кого следует уволить,



кого нанять. Обычно к управлению составом относятся и задачи обучения и развития персонала.

Задача управления структурой обычно решается параллельно с задачей управления составом и позволяет дать ответ на вопрос — кто какие функции должен выполнять, кто кому должен подчиняться, кто кого контролировать и т. д.

Институциональное управление наиболее жесткое и заключается в том, что управляющий орган — Центр — целенаправленно ограничивает множества возможных действий и результатов деятельности управляемых субъектов — агентов. Такое ограничение может осуществляться явными или неявными воздействиями — правовыми актами, распоряжениями, приказами и т. д. или морально-этическими нормами, корпоративной культурой и т. д.

Мотивационное управление более «мягкое», чем институциональное, и заключается в целенаправленном изменении предпочтений (функции полезности) агентов. Такое изменение может осуществляться введением системы штрафов и (или) поощрений за выбор тех или иных действий и (или) достижение определенных результатов деятельности.

Наиболее «мягким» (косвенным), по сравнению с институциональным и мотивационным, и, в то же время, наименее исследованным (в аспекте формальных моделей) является *информационное управление*. В соответствии с введенной в работе [52] классификацией, частные случаи информационного управления: рефлексивное управление [44], при котором Центр воздействует на представления агента о параметрах других участников ОС; активный прогноз, при котором Центр сообщает агентам информацию о будущих результатах (осуществляет прогноз) их деятельности [52]; информационное регулирование [52], при котором центр сообщает агентам информацию о внешней обстановке, влияя тем самым на их поведение.

Простейшая (базовая) модель ОС включает в себя одного управляемого субъекта — агента — и одного управляющего органа — центра, которые принимают решения однократно и в условиях полной информированности. Расширения базовой модели:

— динамические ОС (в которых участники принимают решения многократно) [54];

— ногоэлементные ОС (в которых имеется несколько агентов, принимающих решения одновременно и независимо) [55];

— многоуровневые ОС (имеющие трех- и более уровневую иерархическую структуру) [41, 49, 50];

— ОС с распределенным контролем (в которых имеются несколько центров, осуществляющих управление одними и теми же агентами) [29, 48, 55];

— ОС с неопределенностью (в которых участники не полностью информированы о существенных параметрах) [21, 29];

— ОС с ограничениями совместной деятельности (в которых существуют глобальные ограничения на совместный выбор агентами своих действий — расширение по предмету управления «множества допустимых стратегий») [51];

— ОС с сообщением информации (в которых одним из действий агентов является сообщение информации друг другу и (или) центру — расширение по предмету управления «множества допустимых стратегий») [56].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая краткое изложение сорокалетней истории развития теории активных систем, отметим, что, несмотря на все трудности, мы сохраняем оптимизм. Он подкрепляется тем, что идет процесс восстановления старых связей, расширения новых, приходят молодые талантливые сотрудники. Результаты теоретического исследования моделей и методов управления организационными системами (современное состояние отражено в монографии [29] и учебнике [31]) находят свое применение при решении широкого круга практических задач в самых разных областях. Примерами служат задачи управления:

— предприятиями, корпорациями и регионами [8, 30, 37—39];

— проектами и программами [10, 33, 57—59];

— образовательными системами [60];

— политическими системами [36];

— мультиагентными системами [61];

— организационно-техническими системами [6, 13, 62];

— эколого-экономическими системами [25].

Полученные в теории и практике управления организационными системами результаты свидетельствуют, что применение моделей теории управления представляют собой действенное средство повышения эффективности управления социально-экономическими и организационными системами самого разного масштаба — от бригады и цеха до отрасли и региона. В то же время, практика все время ставит перед специалистами по управлению все новые и новые задачи.

В смысле актуальности дальнейшего развития теории можно выделить следующие классы задач: адекватного учета и дальнейшего развития в формальных моделях современных представлений



психологии, экономики и социологии; разработки моделей и методов синтеза состава и структуры организационных систем, в том числе многоуровневых, динамических и сетевых структур управления; разработки моделей и методов информационного управления; разработки методов оценки эффективности и синтеза комплексных механизмов на основе системы базовых механизмов.

С практической точки зрения следует выделить необходимость обобщения опыта практического применения различных механизмов управления в целях создания прикладных методик и автоматизированных информационных систем, которые позволили бы в каждом конкретном случае применять адекватные и эффективные процедуры управления.

Кроме того, важными организационными задачами представляются, прежде всего, подготовка специалистов по управлению, оснащенных полным арсеналом современных знаний и навыков в области управления, а также популяризация теоретических результатов и установление более тесных содержательных и информационных связей с близкими разделами науки и практики управления, ведь дальнейшее успешное решение теоретических и практических задач управления организационными системами возможно только совместными усилиями математиков, психологов, экономистов, социологов и представителей других отраслей науки.

ЛИТЕРАТУРА²

1. *Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. — М.: СИНТЕГ, 1999.
2. Бурков В.Н., Лернер А.Я. Принцип открытого управления. — М.: ИАТ, 1974.
3. *Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977.
4. *Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. — М.: Наука, 1976.
5. *Бурков В.Н., Кондратьев В.В. Механизмы функционирования организационных систем. — М.: Наука, 1981.
6. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев, В.В. Цыганов, А.М. Черкашин. — М.: Наука, 1984.
7. Согласованное управление активными производственными системами / А.А. Ашимов, В.Н. Бурков, Б.А. Джапаров, В.В. Кондратьев. — М.: Наука, 1986.
8. *Модели и методы материального стимулирования: теория и практика / О.Н. Васильева, В.В. Засканов, Д.Ю. Иванов и др. — М.: Ленанд, 2007.
9. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. — Тбилиси: Мецниереба, 1974.
10. Многоканальные организационные механизмы (Опыт применения в АСУ) / В.П. Авдеев, В.Н. Бурков, А.К. Еналеев, Т.В. Киселева. — М.: ИПУ, 1986.
11. Опоицев В.И. Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения. — М.: Наука, 1977. — 248 с.
12. *Модели и механизмы распределения затрат и доходов в рыночной экономике / В.Н. Бурков, И.А. Горгидзе, Д.А. Новиков, Б.С. Юсупов. — М.: ИПУ РАН, 1997.
13. *Большие системы: моделирование организационных механизмов / В.Н. Бурков, Б. Данев, А.К. Еналеев и др. — М.: Наука, 1989.
14. Цыганов В.В. Адаптивные механизмы в отраслевом управлении. — М.: Наука, 1991.
15. Бурков В.Н., Ириков В.А. Модели и методы управления организационными системами. — М.: Наука, 1994.
16. Управление перераспределением ресурсов путем натурального обмена / О.С. Багатурова, М.Б. Кацнельсон, Л.М. Крайская, А.Г. Мамионов. — М.: ИПУ, 1978.
17. *Бурков В.Н., Багатурова О.С., Иванова С.И. Оптимизация обменных производственных схем в условиях нестабильной экономики. — М.: ИПУ, 1996.
18. *Коргин Н.А. Механизмы обмена в активных системах. — М.: ИПУ, 2003. — 124 с.
19. Кондратьев В.В., Щепкин А.В. Реализация деловых игр на ЭВМ. — М.: ИАТ, 1974.
20. *Щепкин А.В. Внутрифирменное управление (модели и механизмы). — М.: ИПУ РАН, 2001. — 80 с.
21. *Новиков Д.А. Стимулирование в социально-экономических системах (базовые математические модели). — М.: ИПУ, 1998. — 216 с.
22. Балашов В.Г., Ириков В.А. Технологии повышения финансового результата предприятий и корпораций. — М.: ПРИОР, 2002. — 512 с.
23. *Ириков В.А., Тренев В.Н. Распределенные системы принятия решений. — М.: Наука, 1999.
24. *Модели и методы управления безопасностью / В.Н. Бурков, Е.В. Грацианский, С.И. Дзюбко, А.В. Щепкин. — М.: СИНТЕГ, 2001.
25. *Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Механизмы управления эколого-экономическими системами. — М.: Физматлит, 2008.
26. *Бурков В.Н., Щепкин А.В. Экологическая безопасность. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 92 с.
27. *Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. — М.: СИНТЕГ, 2007. — 664 с.
28. *Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. — М.: СИНТЕГ, 2002. — 148 с.
29. *Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — М.: Физматлит, 2005.
30. *Новиков Д.А. Стимулирование в организационных системах. — М.: СИНТЕГ, 2003.
31. *Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: Учебник. — М.: Либроком, 2009.
32. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Вороняев В.И. Математические основы управления проектами. — М.: Высшая школа, 2005. — 420 с.
33. *Новиков Д.А. Управление проектами: организационные механизмы. — М.: ПМСОФТ, 2007.
34. *Цветков А.В. Стимулирование в управлении проектами. — М.: Апостроф, 2001. — 144 с.
35. *Заложнев А.Ю. Модели и методы внутрифирменного управления. — М.: Сторм-Медиа, 2004. — 320 с.

² Работы, отмеченные звездочкой, можно найти в свободном доступе на сайте теории управления организационными системами www.mtas.ru.



36. *Цыганов В.В., Бородин В.А., Шишкин Г.Б.* Преемник: механизмы эволюции России. — М.: Академический проект, 2007. — 396 с.
37. **Иващенко А.А., Новиков Д.А.* Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. — М.: КомКнига, 2006.
38. *Нелинейные методы прогнозирования экономической динамики региона / Р.М. Нижегородцев, Е.Н. Грибова, Л.П. Зенькова, А.Ю. Хатько.* — Харьков: ИД «Инжэк», 2008. — 320 с.
39. *Проблемы информационной экономики. Вып. VII. Стратегия инновационного развития российской экономики: Сб. науч. трудов/ Под ред. Р.М. Нижегородцева.* — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. — 400 с.
40. **Математические модели организаций / А.А. Воронин, М.В. Губко, С.П. Мишин, Д.А. Новиков.* — М.: Ленанд, 2008.
41. **Воронин А.А., Мишин С.П.* Оптимальные иерархические структуры. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 210 с.
42. **Губко М.В.* Математические модели оптимизации иерархических структур. — М.: Ленанд, 2006. — 264 с.
43. **Мишин С.П.* Оптимальные иерархии управления в социально-экономических системах. — М.: ПМСОФТ, 2004. — 207 с.
44. **Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Рефлексивные игры. — М.: СИНТЕГ, 2003. — 160 с.
45. **Чхартишвили А.Г.* Теоретико-игровые модели информационного управления. — М.: ПМСОФТ, 2004. — 240 с.
46. **Искаков М.Б.* Модели и методы управления привлечением вкладов в банковскую сберегательную систему. — М.: ИПУ РАН, 2006. — 156 с.
47. **Буркова И.В.* Метод дихотомического программирования в задачах управления проектами. — Воронеж: ВГАСУ, 2004. — 100 с.
48. **Караваев А.П.* Модели и методы управления составом активных систем. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 151 с.
49. **Новиков Д.А.* Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем. — М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. — 150 с.
50. **Новиков Д.А.* Сетевые структуры и организационные системы. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 102 с.
51. **Новиков Д.А.* Институциональное управление организационными системами. — М.: ИПУ, 2003. — 68 с.
52. **Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Активный прогноз. — М.: ИПУ, 2002. — 101 с.
53. **Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г.* Прикладные модели информационного управления. — М.: ИПУ, 2004. — 130 с.
54. **Новиков Д.А., Смирнов И.М., Шохина Т.Е.* Механизмы управления динамическими активными системами. — М.: ИПУ, 2002. — 124 с.
55. **Губко М.В.* Механизмы управления организационными системами с коалиционным взаимодействием участников. — М.: ИПУ, 2003. — 118 с.
56. **Петраков С.Н.* Механизмы планирования в активных системах: неманипулируемость и множества диктаторства. — М.: ИПУ, 2001. — 135 с.
57. **Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Как управлять проектами. — М.: СИНТЕГ, 1997.
58. **Гламаздин Е.С., Новиков Д.А., Цветков А.В.* Механизмы управления корпоративными программами: информационные системы и математические модели. — М.: Спутник, 2004.
59. **Матвеев А.А., Новиков Д.А., Цветков А.В.* Модели и методы управления портфелями проектов. — М.: ПМСОФТ, 2005.
60. **Новиков Д.А.* Теория управления образовательными системами. — М., 2009.
61. **Новиков Д.А.* Математические модели формирования и функционирования команд. — М.: Физматлит, 2008.
62. **Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н.А. Абрамовой, Д.А. Новикова.* — М.: КомКнига, 2006.



Бурков Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией активных систем ИПУ, профессор МФТИ, действительный член РАЕН, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ. Более 40 лет работает в области управления большими системами. Вице-президент Российской ассоциации по управлению проектами, основатель теории активных систем, один из ведущих специалистов по управлению социально-экономическими системами. Член редколлегии журнала «Проблемы управления». ☎(495) 334-79-00, ✉vlab17@bk.ru.



Новиков Дмитрий Александрович — д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, зам. директора ИПУ, профессор МФТИ. Автор более 350-ти научных работ по теории управления системами междисциплинарной природы, в том числе — по системному анализу, теории игр, принятию решений, управлению проектами и механизмам управления организационными системами. Главный редактор журнала «Проблемы управления». ☎(495) 334-93-31, ✉novikov@ipu.ru.



Технические средства автоматики и вычислительной техники

УДК 004.3'144;681.5

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Дан ретроспективный анализ исследований Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН в области развития технических средств и систем автоматизации с 1939 по 2009 г. Отмечены имена ученых, внесших заметный вклад в развитие соответствующего направления. Основное внимание сосредоточено на результатах, полученных в последние 10 лет. Анализируется научно-технический потенциал совокупности лабораторий, работающих в области технических средств и систем автоматизации.

Ключевые слова: элементы, устройства, технические средства, автоматизация, системы управления, вычислительная техника, логическое управление, диагностика, надежность.

ВВЕДЕНИЕ

Работы Института проблем управления в области создания технических средств и систем автоматики в ретроспективе отражают процесс развития автоматизации в стране. В начальный период решались отдельные частные задачи создания конкретных устройств регулирования, следящих устройств, первичных преобразователей, методов контроля электрических и неэлектрических параметров, аппаратуры релейно-контактных телемеханических устройств и др.

Наиболее значительный вклад Института в начальном периоде — это создание по оборонному заказу в годы Великой Отечественной войны средств контроля размеров и чистоты обработки массовых изделий оборонной промышленности. Внедрение в производство разработанных в Институте контрольных автоматов позволило существенно сократить штат контролеров, что было особенно важно в военное время. Эта работа сопровождалась глубоким научным анализом состояния вопроса, переросла запросы конкретного производства и уже после войны была обобщена Институтом в коллективной монографии. Эта практика была и осталась типичной для сочетания прикладных и фундаментальных исследований в ИАТе. Вот яркий пример из тех лет. М.А. Гаврилов, известный практик и ученый-телемеханик (в последующем чл.-корр. АН СССР), в 1939—1941 гг. был руководителем работ по созданию системы телемеханики для управления городским освещением в Москве. Аппаратура телемеханики тех лет — ре-

лейные устройства — была предметом изобретательства. М.А. Гаврилов в течение 1939—1945 гг. создает теорию релейно-контактных схем (использует аппарат математической логики — тогда неведомый для исследователей технических объектов), добивается ее признания и в 1950 г. издает первую в мире монографию по этой тематике [1].

В те же военные годы по заказу ВМФ в Институте велись работы по созданию методов борьбы с минно-торпедной опасностью. В период с 1942 по 1944 г. исследованы различные типы неконтактных мин противника, выполнены расчеты магнитных тралов, разработаны теоретические и экспериментальные методы исследования систем реагирующих органов и воспринимающих элементов. После войны разработанные методы и аппаратура были применены для ликвидации взрывоопасных предметов, оставшихся на суше и на море. Созданы приборы для обнаружения локальных аномалий магнитного и электромагнитного полей, испытаны воспринимающие элементы, основанные на разнообразных принципах действия: индукционных, магнитомодуляционных и ядерно-прецессионных.

В послевоенные годы в стране начинают создаваться средства автоматизации и электронной аналоговой вычислительной техники. В 1949 г. под руководством академика В.А. Трапезникова и д-ра техн. наук Б.Я. Когана создается первая отечественная электронная моделирующая установка ЭМУ-1 [2, 3]. В это же время под руководством д-ра техн. наук Б.С. Сотскова (впоследствии чл.-корр. АН СССР) предлагается и экспериментально обосновывается идея магнитных элементов автоматики с прямоугольной петлей гистерезиса, а в





1949—1950 гг. выпускается первая отечественная серия магнитных усилителей [4].

В 1950-х гг., в связи с интенсивным развитием отечественной промышленности, стало ясно, что назрела необходимость в разработке не отдельных приборов, а интегрированных систем, в целом решающих задачи комплексной автоматизации. В это время академиком В.А.Трапезниковым и д-ром техн. наук Б.С. Сотсковым выдвигается идея унификации средств автоматизации технологических процессов с помощью блочно-модульного принципа их построения. Этот принцип оказался столь плодотворным, что на его базе были заложены основы построения агрегатной унифицированной системы приборов, освоенных в промышленности в 1950-е гг. [2, 5, 6].

Начало 1960-х гг. характеризуется бурным развитием теории и практики приборостроения. Под руководством д-ра техн. наук Д.И. Агейкина разрабатываются и исследуются новые принципы построения широкого спектра датчиков. Выпущенная под его руководством монография по датчикам автоматического контроля и регулирования, обобщающая и систематизирующая принципы построения датчиков тех лет, широко используется специалистами до нашего времени [7]. В эти же годы в Институте под руководством академика Б.Н. Петрова велись исследования, связанные с решением задач контроля запасов и расходования ракетных топлив; были разработаны принципы построения высокочастотных датчиков уровня запасов топлива в условиях неопределенности количественного состава двухфазных потоков с неизвестной конфигурацией, развита теория построения инвариантных к возмущающим факторам измерений, разработаны и созданы датчики на базе электродинамических систем с распределенными параметрами. Результаты исследований положены в основу унифицированного комплекса высокочастотных уровнемеров и сигнализаторов жидких и сыпучих тел, используемого и в настоящее время в ракетно-космических системах [8].

На базе результатов, достигнутых в области пневмоавтоматики (руководители д-ра техн. наук М.А. Айзерман и А.А. Таль), предложен элементный принцип построения приборов пневмоавтоматики, на основе которого разработана унифицированная система пневматических модулей [9].

Работы в области создания приборов и средств автоматизации велись столь широким фронтом, что потребовалось решение задачи по систематизации результатов, полученных при разработке средств автоматизации с электрическими цифровыми и аналоговыми сигналами, а также сигналами в пневматике, пневматике и гидравлике. Эта задача была успешно решена коллективом специалистов под руководством чл.-корр. АН СССР

Б.С. Сотскова и тем самым было положено начало созданию Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) [6, 10]. Появление ГСП стало крупным событием в практике мирового приборостроения. Впервые разнообразнейшая и сложнейшая система взаимосвязанных технических средств была реализована в общегосударственном масштабе на единых системотехнических принципах, сформирована общая структура системы, позволившая обеспечить единый подход к разработке средств автоматики с различными энергетическими носителями сигналов связи, выработались принципы взаимной конструктивной, информационной и эксплуатационной совместимости технических средств.

Начало 1980-х гг. ознаменовалось появлением нового поколения средств автоматизации, основанных на микропроцессорах. В микроэлектронике еще в середине 1960-х гг. была выдвинута концепция однородных микроэлектронных логических и вычислительных структур, состоящих из однотипных функциональных элементов с одинаковыми связями между ними. Концепция разрабатывалась под руководством д-ра техн. наук И.В. Прангишвили в ряде организаций АН СССР. В работах по этому направлению было показано, что в использовании избыточности, регулярности, параллельности и перестраиваемости однородных структур и связей состоит кардинальный принцип повышения надежности и производительности логических и вычислительных устройств. Дальнейшее развитие нетрадиционных принципов динамической перестраиваемости вычислительных средств привело к разработке высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с перестраиваемой структурой (ПС) — как с одним, так и со многими потоками команд и данных [11]. На указанных принципах Институтом совместно с НПО «Импульс» (г. Северодонецк, Украина) были разработаны и освоены в серийном производстве многопроцессорные комплексы: ПС-2000 (1980 г.) и ПС-3000 (1982 г.). Уникальный опыт, приобретенный при создании комплексов ПС, в настоящее время используется при построении отказоустойчивых параллельных бортовых систем, в разработке оригинальных средств управления вычислительными процессами для систем реального времени.

В 1986 г., после аварии на Чернобыльской АЭС, Институту было поручено возглавить работы по созданию перспективной АСУТП для АЭС. В Институте, на основе анализа положения в области систем управления особо ответственными объектами и последних достижений в области методов управления и обеспечения надежности, была сформулирована концепция создания распределенной отказобезопасной системы управления, отвечаю-



щей требованиям МАГАТЭ по основным параметрам безопасности и уровню автоматизации. Одно из важнейших положений концепции заключалось в обосновании необходимости создания нового типа технических средств автоматизации — средств программируемой автоматики с параллельной структурой — СПА-ПС [12, 13]. Разработанная в Институте концепция и основные технические решения СПА-ПС основывались на глубоких исследованиях по теории логического синтеза, логических вычислений и способах обеспечения отказо-безопасности на основе схем с самоконтролем. Эти исследования начаты еще в 1960-х гг. в научной школе чл.-корр. АН СССР М.А. Гаврилова и развивались его учениками (А.А. Амбарцумяном, А.И. Потехиным). Основные технические идеи, положенные в основу СПА-ПС, заключаются в распределенности, специализации, контролируемости и асинхронности процессов обработки и коммуникации, гибкой резервируемости структур. В 1994—1997 гг. СПА-ПС были освоены в серийном производстве в г. Омске на заводе АО НПК «Автоматика» и сертифицированы органами Госстандарта в качестве средств измерений и на соответствие требованиям ГОСТ по безопасности.

Подводя итоги 60-летнего периода, отметим, что ученые и разработчики Института активно участвовали в процессе становления и развития отечественных технических средств и систем автоматизации. В Институте разрабатывались и исследовались новые принципы построения и совершенствования элементов и устройств автоматики, перспективные классы технических средств управления и вычислительной техники с новыми возможностями и особенностями, новые подходы и принципы построения систем технических средств, общие методы оценивания качества и эффективности технических средств, методов их расчета и автоматизированного проектирования, систематизировались и обобщались достижения в этой области.

Перечислим лишь некоторые из работ, ставшие наиболее приметными достижениями Института в области создания новых элементов и устройств и их теории (большинство отмечены правительственными наградами):

- разработка серийно выпускаемых аналоговых вычислительных машин ЭМУ-10 и гибридных вычислительных машин «Русалка» (акад. В.А. Трапезников, д-р техн. наук Б.Я. Коган¹; Государственная премия СССР);

¹ Здесь и далее в скобках указаны лишь «первые лица» — создатели и руководители соответствующих направлений и школ. За каждым из них стоят их соратники, ученики и последователи.

- теория и методы построения пневмо- и гидросистем (д-ра техн. наук М.А. Айзерман, А.А. Таль и Л.А. Залманзон; Ленинская премия);
- принципы построения разнообразных датчиков на основе новых физических явлений, материалов и схмотехнических решений (д-р техн. наук Д.И. Агейкин; Государственная премия СССР);
- новые магнитные элементы автоматики и вычислительной техники, в том числе запоминающие элементы на магнитных доменах (д-ра техн. наук М.А. Розенблат и Н.П. Васильева);
- новые принципы построения устройств ввода аналоговой информации в цифровые вычислительные машины и создание на их основе высокоточных аналоговых усилителей и аналого-цифровых преобразователей (д-р техн. наук Д.Е. Полонников; Государственная премия СССР);
- принципы построения высокочастотных датчиков уровня и запасов в условиях невесомости (д-р техн. наук В.А. Виктор; Государственная премия СССР);
- принципы построения автоматических преобразователей и измерителей комплексных величин переменного тока (д-ра техн. наук В.Ю. Кнеллер и Ю.Р. Агамалов; Государственная премия СССР);
- принципы построения и теория регуляторов различного типа, в том числе и регуляторов с переменной структурой (д-р техн. наук Е.К. Круг, акад. С.В. Емельянов, д-р техн. наук В.И. Уткин; Ленинская премия);
- теория и принципы построения систем технической диагностики (чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко);
- принципы построения однородных параллельных вычислительных структур и разработка на их основе высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с перестраиваемой структурой: ПС-2000 и ПС-3000 (акад. НАН Грузии И.В. Прангишвили).

1. НОВОЕ ВРЕМЯ

В новом времени (1990—2009 гг.), в связи с развалом Союза, ликвидацией отраслевой науки, многочисленных институтов и региональных ПО «Автоматика», АСУ и др., у лабораторий Института, работающих в области технических средств и систем автоматизации (ТС и СА), резко сократились возможности выхода на объекты автоматизации в реальном секторе экономики (в прошлом у многих связь была через отраслевые институты).

Более того, в условиях нарождающегося рынка сложилась практика передачи заказов на автоматизацию объектов в промышленности фирмам-интеграторам, определяющий стиль деятельности которых состоит в перепродаже западных



разработок, путем переложения функциональности действующих систем на новые более сложные и дорогие технические и программные средства.

Кроме того, в силу экономических причин было ликвидировано опытное производство в Институте. Казалось, это создало непреодолимые трудности в работе лабораторий в области ТС и СА. Однако научный задел, сложившиеся творческие связи со специалистами крупных предприятий, научный потенциал коллективов лабораторий не дали угаснуть нашей работе.

Более того, тематика исследований существенно расширилась. Помимо традиционных направлений таких, как датчики, элементы, приборы, надежность, появились направления, связанные с разработкой систем управления, измерения, вычисления, мониторинга, обучения, моделирования, что косвенно подтверждается большим разнообразием тематических секций на недавно прошедшей конференции УКИ'08.

На новом этапе задачи, стоящие перед Институтом по созданию новых технических средств, объединились с задачами создания систем автоматизации.

Ниже мы представляем лаборатории Института, работающие в области ТС и ТА, в формате: название лаборатории (ее заведующий), краткое изложение основных результатов², полученных в последние 10 лет.

2. СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

2.1. Лаборатория газогидродинамических средств автоматизации

(заведующий канд. техн. наук А.М. Касимов, ✉ kasimov@ipu.ru)

Датчики. Разработаны струйные первичные измерительные преобразователи размера, положения, скорости, угловой скорости, объемного и массового расхода, ускорения. Проведены исследования предложенного компенсационного расходомера, на порядок повышающего точность и динамический диапазон измерения (класс 0,1 при динамическом диапазоне 500) [1, 2].

Элементы. Проведены исследования по радикальному повышению быстродействия струйных элементов [3]. Разработан струйный тепловой тормоз, который позволяет управлять температурой в помещении, сократив при этом долю остаточной теплоотдачи до 15–20 %. Разработано уст-

² Авторы текстов основных результатов — заведующие лабораториями.

ройство сопряжения с объектом принципиально нового прибора — оптоструйного преобразователя. Для сопряжения пневматических и электронных систем управления (СУ) разработаны газоэлектронные и электрогазовые преобразователи информационных сигналов.

Разработаны и доведены до серийного выпуска устройства струйной автоматики для управления параметрами авиационных двигателей (22 регулятора на 12-ти типах двигателей — рис. 3 на вклейке к с. 43). Подтверждена высокая надёжность и большая экономическая эффективность таких устройств. Нарботка на отказ струйной техники составляет более 5 млн. ч [1, 4].

Приборы. Предложены новые дифференциальные методы измерения расходов текучих продуктов с расширенными динамическими диапазонами для струйных, струйно-вихревых и компенсационных расходомеров. Опытный образец струйного расходомера водяного теплоносителя с расчетным ресурсом около 80 тыс. ч безотказно испытывался в течение двух лет на Ленинградской АЭС.

Разработанные бытовые струйные счетчики газа выпускаются предприятиями Омска и Чистополя (рис. 4 на вклейке к с. 43). Бесклапанные порционные дозаторы жидкостей используются на ряде малых предприятий.

Системы управления. Разработаны принципы построения пневматических СУ процессами очистки промышленных сточных вод гальванических производств. Предложен метод и построено устройство управления аэростатическими опорами, предупреждающее автоколебания. Разработан пневмодинамический метод контроля герметичности, позволяющий «всухую» проверять изделия из вязко-упругих материалов массового производства.

Для построения высоконадежных СУ, предназначенных для работы в экстремальных условиях, создана система устройств агрегатно-интегральной струйной техники (АИСТ) (рис. 5 на вклейке к с. 43). Все агрегаты АИСТ выполнены из жаропрочных сталей и работоспособны при температурах окружающей среды от –40 до +500 °С (рис. 6 на вклейке к с. 43). Они успешно используются в управлении параметрами авиационных двигателей на самолетах гражданской авиации. Суммарная наработка эксплуатируемых струйных СУ составляет 20 млн. ч.

Струйные средства успешно применяются для автоматизации сборочных операций в часовой промышленности в качестве манипуляторов и устройств контроля.

Предложены принципы построения комбинированных СУ летательными аппаратами (ЛА). Раз-



работана резервная СУ самолетом, обеспечивающая управляемость при воздействии электромагнитных помех на бортовые электронные системы управления. Получены схемотехнические решения построения основных узлов аппаратуры резервного канала СУ летательными аппаратами. Предложены методы обеспечения точности и непрерывности управления ЛА в условиях действия дестабилизирующих факторов электромагнитной природы [5].

2.2. Лаборатория ферромагнитных тонкопленочных элементов для систем управления

(заведующий д-р техн. наук С.И. Касаткин, ✉ serkasat@ipu.ru)

Разработаны и исследованы принципы действия и конструкции магниторезистивных нанозапоминающих элементов (датчиков магнитного поля и тока, запоминающих элементов) на основе анизотропных и спин-туннельных магниторезистивных наноструктур. Созданы модели процессов перемагничивания магниточувствительных нанозапоминающих элементов и выполнен анализ их работоспособности. Нанозапоминающие элементы на основе спин-туннельных магниторезистивных наноструктур обладают гигантским магниторезистивным эффектом, появляется возможность создания спинового транзистора и микропроцессора на базе запоминающих и логических спин-туннельных магниторезистивных нанозапоминающих элементов [1].

Исследованы магнитополупроводниковые магниторезистивные наногетероструктуры и нанозапоминающие элементы на их основе. Впервые обнаружено магнитное взаимодействие между полупроводниковым SiC слоем и ферромагнитной плёнкой, приводящее к изменению магнитных свойств магнитной плёнки. Обнаруженные эффекты позволяют разрабатывать магниторезистивные нанозапоминающие элементы на новых принципах действия. Разрабатываемые магнитополупроводниковые нанодатчики составят конкуренцию существующим анизотропным и спин-вентильным магниторезистивным датчикам магнитного поля и тока [2].

Разработана модель кольцевого магниточувствительного нанозапоминающего элемента на основе многослойной анизотропной магниторезистивной наноструктуры и выполнен анализ его работоспособности. Кольцевой магниторезистивный нанозапоминающий элемент перспективен при субмикронных размерах в качестве запоминающего элемента и биосенсора [3].

Разработана модель для определения высокочастотных свойств анизотропного магниторезистивного нанозапоминающего элемента произвольной формы на основе многослойной металлической наноструктуры и выполнен анализ его параметров [4].

2.3. Лаборатория сенсоров и сенсорных систем

(заведующий д-р техн. наук В.Д. Зотов, ✉ vdz@ipu.ru)

Исследования физических свойств полупроводниковых структур с L-образными вольтамперными характеристиками (ВАХ) выявили ряд перспективных направлений, которые могут быть положены в основу создания сенсоров с функциональными параметрами, радикально превосходящими параметры известных полупроводниковых сенсоров тех же назначений [1, 2]. Сенсоры на основе структур с L-образными ВАХ позволяют не только воспринимать внешнюю неэлектрическую информацию, но и производить на молекулярном уровне в объеме кристалла ее преобразование в выходной электрический сигнал, удобный для пользователя без применения внешних электрических схем. В зависимости от соотношения концентраций вносимых примесей физические свойства структур меняются, и они становятся чувствительными к различным видам внешних воздействий: магнитному полю, силовому воздействию, температуре, световому излучению [3, 4].

Начиная с конца 1990-х гг., проводились исследования функциональных возможностей Z-термисторов, которые позволили выявить основные режимы их функционирования: аналоговый режим (термосопротивление) на начальном участке ВАХ; температурно-пороговый режим (при переходе в состояние со шнуром тока); температурно-частотный режим, обусловленный переходным процессом при возникновении шнура тока.

Исследованы параметры и возможности промышленного использования различных режимов работы Z-термисторов, дающих возможность разрабатывать и создавать портативные средства контроля, диагностики и управления, обладающие высокими техническими и эксплуатационными характеристиками. Получена теоретическая оценка выходного сигнала Z-термистора в зависимости от параметров структуры и внешних воздействий. Отметим, что термин «термистор» в нашем случае далеко не полностью отражает функциональные возможности разработанного термопреобразователя [5, 6].

Разработаны принципы реализации портативных термодиагностических приборов медицинского назначения на основе Z-термистора, такие как термометр для незрячих со звуковым сигналом, прибор для обнаружения онкологических новообразований и исследования вен, система дистанционного мониторинга температуры тяжелобольных и детей, принцип построения термогенератора импульсов.

В одной из разновидностей структур с L-образной ВАХ была обнаружена их чувствительность к

ультрафиолетовому излучению, которая проявляется в изменении проводимости структуры во времени, т. е. реализуется накопление УФ радиации в течение десятков минут или дозы УФ облучения. Это явление было положено в основу разработки миниатюрных дозаторов УФ облучения. Для их разработки были проведены исследования структур в условиях естественного и искусственного УФ излучения, а также анализ имеющейся информации по отсекающим и узкополосным светофильтрам.

Разработаны Z-термисторы, обладающие техническими характеристиками, превосходящими все известные в настоящее время полупроводниковые температурные сенсоры (как, например, NTC-термистор, температурочувствительные $p-n$ переходы и др.), что делает их привлекательными для создания нового класса приборов температурного контроля, диагностики и управления. Для иллюстрации уникальных возможностей Z-термисторов разработаны принципы построения ряда портативных приборов медицинского назначения, пожарного извещения, устройства двухпозиционного регулирования температуры, автоматического регулирования температуры, генератора импульсов и др. Объектами температурного регулирования могут быть отопительные системы жилых, производственных и складских помещений (например, зернохранилищ), салоны автомобилей и авиалайнеров, различные двигатели, трансмиссии, тормозные системы транспортных средств, электропроводки, электроразъемы, средства пожарной сигнализации (возможно параллельное подключение до десяти Z-термисторов на одной линии), медицинская контрольно-измерительная и физиотерапевтическая аппаратура, объекты биотехнологий, парники, оранжереи и многие другие объекты промышленного, бытового, медицинского и сельскохозяйственного назначения. Разработаны схемы включения Z-термисторов, позволяющие максимально просто и надежно реализовать управление системами климат-контроля различных назначений [7].

Разработаны методы анализа квазипериодических биосигналов, на их основе проведено исследование диагностической значимости ритмической структуры пульсового сигнала в задачах медицинской диагностики, в частности, для выявления ранних признаков артериальной гипертензии в детском возрасте. Выявлены новые информативные признаки, позволяющие осуществить раннюю диагностику артериальной гипертензии [8].

Рассмотрены возможности использования байесовых доверительных сетей для создания совокупного учета разнородных факторов, определяющих

надежность оперативного персонала и безопасность человеко-машинных систем. Разработан метод оценки надежности человека-оператора распределенных автоматизированных информационных управляющих человеко-машинных систем [9].

2.4. Лаборатория волновых методов и средств получения информации

(заведующий канд. техн. наук Б.В. Лункин, ✉ Lunbv@ipu.rssi.ru)

Метод диагностирования датчиков на объектах контроля и управления. Предложен метод диагностирования датчиков на соответствие метрологическим требованиям непосредственно на объекте в режиме эксплуатации. Метод основан на использовании заранее полученных тарировочных характеристик и основных погрешностей для различных значений влияющих факторов, на формировании в процессе диагностирования эталонного сигнала, измерении влияющих факторов и сравнении показаний датчика со значениями, полученными при тарировании. Предложена процедура диагностирования для случаев, когда получение эталонного сигнала затруднено. В основе процедуры — формирование в датчике двух каналов информации, функции преобразования которых сопровождаются тарировочными таблицами. Соответствие тарировочным характеристикам определяется нахождением показаний датчика по каждому каналу в определенных интервалах [1].

Основы теории чувствительных элементов (ЧЭ) радиоволновых датчиков. Предложены методы многопараметровых и инвариантных измерений с применением лишь одного ЧЭ [2], методы построения высокочувствительных многозондовых датчиков [3]. Получены зависимости резонансных частот ЧЭ датчиков, имеющих слоистую структуру, состоящую из совокупности диэлектриков и проводников. На основе зависимостей предложен синтез ЧЭ датчика уровня с линейной выходной характеристикой и принцип построения ЧЭ датчика для измерения уровня среды и толщины пленки на ее поверхности [4].

Способ определения объемного содержания компонентов эмульсии типа «диэлектрик — среда с переменной проводимостью» по параметрам электромагнитного резонатора. Получены и исследованы зависимости основных параметров (частоты, добротности, амплитуды) электромагнитных колебаний, устанавливаемых в ЧЭ (резонаторе специального типа, встраиваемого в трубопровод) радиочастотного датчика в режиме резонанса для потоков эмульсионных смесей. Эти зависимости положены в основу разработки алгоритмов определения объемного содержания компонентов нефтеводяной эмульсии (или смесей «нефтепродук-



ты — вода») с произвольной степенью минерализации воды [5].

Способы определения положения границ раздела сред в резервуарах на основе радиочастотных уровней. Рассмотрены возможности решения задачи измерения положения границ раздела слоистых сред в классе радиочастотных датчиков. Представлены принципы формирования ЧЭ на основе пространственно распределенных отрезков длинной линии. Разработаны ЧЭ и исследованы алгоритмы измерения для криогенных жидкостей, и для сред типа «воздух — топливо — вода» с инвариантностью к свойствам топлива. Полученные результаты могут быть применены для контроля количества топлива в баках транспортных средств [6] и массы сжиженных газов с инвариантностью к их фазовому состоянию в замкнутых объемах [7].

Способ определения объемного содержания трехслойных потоков в трубопроводах на основе многоканального радиочастотного датчика. Предложен способ бесконтактного измерения объемов компонентов трехслойного потока, разделенных между собой плоскими границами раздела. Способ основан на применении в качестве ЧЭ резонатора, в котором возбуждаются два перекрестных электромагнитных поля в режиме резонанса. Получены зависимости собственных частот, соответствующих этим полям, от объемов и диэлектрических проницаемостей компонентов. Зависимости входят в систему уравнений, из которой по измеренным собственным частотам определяются искомые объемы [8].

Принципы построения многоканального ЧЭ для измерения объема жидкости и ее положения в пространстве бака в условиях неопределенности. Предложен ЧЭ, в котором сформированы гибридные колебания полей, возбуждаемых в баке и дополнительном малогабаритном резонаторе. Результаты исследования такой структуры датчика легли в основу создания бортовой системы контроля запасов компонентов топлива в баках Международной космической станции [9]. Воплощение полученных результатов в конкретных разработках показано на рис. 1 (см. вклейку).

Показана возможность решения задачи измерения, в которой одновременно требуется инвариантное измерение объема жидкости при неопределенном ее положении и идентификация ее положения в пространстве бака. Предложена многозондовая система, состоящая из тонких проводников, фиксированных около стенки бака и возбуждаемых как отрезки длинной линии. Число проводников выбирается, исходя из требуемой точности измерения.

2.5. Лаборатория микро- и нанозлектронных элементов и устройств систем управления

(заведующий д-р техн. наук Р.Р. Бабаян, ✉ robab@ipu.ru)

Обнаружен и исследован эффект накопления и быстрого переноса заряда в узлах аналого-цифровых интегральных микросхем, позволивший существенно повысить их быстродействие. На основе предложенного принципа разработана серия (более 10-ти типов) преобразователей «напряжение — частота» с погрешностью 0,01 % до частоты 150 МГц. На момент разработки такие устройства не имели зарубежных аналогов [1].

Обнаружен и исследован эффект тепловой обратной связи в аналого-цифровых интегральных схемах и предложено использовать этот эффект для повышения точности воспроизведения непрерывных сигналов [2].

Обнаружен новый физический эффект — односторонняя проводимость в тонких пленках бинарных сплавов никель-титан и алюминий-титан. Использование данного эффекта позволило разработать функциональные преобразователи непрерывных сигналов.

Предложен метод выделения полной погрешности воспроизведения непрерывного сигнала из выходного сигнала воспроизводящего линейного блока. Обоснована применимость метода для сигналов произвольной формы. На основе анализа погрешностей воспроизведения разработан принцип построения линейных воспроизводящих блоков повышенной точности и быстродействия [4].

Исследованы конвейерные арифметические устройства «волнового» типа на основе парафазных КМДП-макроэлементов субмикронного технологического диапазона. Разработаны новые схемные методы повышения быстродействия сумматоров (32 разряда) с последовательным переносом до 1,2 ГГц. Исследован эффективный алгоритм на основе бинарного принципа свертки на основе фундаментального оператора переноса. Разработаны 32-разрядные сумматоры с тактовой частотой до 4 ГГц и 64-разрядные до 3 ГГц. Разработаны матричные умножители комбинаторного типа с макроэлементом группового парафазного генератора частных произведений. Разработанные технические решения умножителя матричного типа позволяют применять их в конвейерных системах одноконтурного вида при разрядности операндов до 32-х с тактовой частотой до 1,5 ГГц и до 54-х с тактовой частотой до 0,8 ГГц [5].

2.6. Лаборатория преобразования измерительной информации

(заведующий д-р техн. наук В.Ю. Кнеллер, ✉ vkneller@ipu.ru)

2.6.1. Разработка теории и новых принципов построения перспективных средств преобразования величин переменного тока

Разработана концепция комплексного адаптивного подхода к построению и проверке сложных средств преобразования измерительной информации, и, конкретно, к построению и проверке, включая самопроверку в режиме «on-line», многофункциональных преобразователей иммитанса с гибкими алгоритмами функционирования и модульными структурами [1].

Разработаны методы формализованного синтеза нулевых измерительных цепей (НИЦ) на базе графового и дескриптивного логико-математического подхода, основанного на обобщении уравнений равновесия НИЦ с помощью понятия иммитанса и представлении альтернативных вариантов НИЦ средствами булевой алгебры. Доказано фундаментальное для теории измерительных цепей положение о невозможности измерения с помощью пассивных НИЦ частотозависимых параметров иммитанса в непрерывном диапазоне частот и предложен путь синтеза активных НИЦ, позволяющих это реализовать [2].

Разработаны теоретические основы и принципы реализации дискретного гармонического анализа периодических сигналов на базе предложенного метода комбинированной (неравномерной и равномерной) дискретизации сигналов, названного методом расщепляющихся множеств. Решена задача раздельного измерения совокупности гармонических сигналов и впервые реализовано аддитивное дискретное преобразование Фурье периодических сигналов [3].

Разработаны новые методы аналого-цифровой фильтрации при фазочувствительном преобразовании (ФЧП) сигналов переменного тока. Предложен метод ФЧП сигналов, основанный на представлении их в виде массивов интегральных дискрет, допускающий гибкую адаптацию функции преобразования к частоте тестового сигнала и характеру помех при минимальных аппаратурных затратах на его реализацию [4]. Разработаны методы синтеза ФЧП, обеспечивающих эффективное подавление сетевой и экспоненциальных помех. Разработана концепция построения на основе помехоустойчивого ФЧП универсальных широкополосных виртуальных средств преобразования комплексных величин — нового подкласса средств измерений импеданса на основе ПК, обладающих характеристиками лучших автономных приборов

при гораздо больших возможностях обработки, хранения и представления измерительной информации и невысокой стоимости [5]. Разработаны и внедрены два поколения таких виртуальных приборов, которые по своим возможностям и характеристикам не имеют равных в мире.

Показана возможность повышения точности определения параметров объектов с дробно-иррациональной передаточной функцией путём учёта априорной информации [6].

Выявлены, систематизированы и проанализированы особенности и закономерности построения преобразователей среднеквадратического значения напряжения и преобразователей активной мощности, а также их специфических узлов. Разработан и исследован ряд новых принципов построения и способов совершенствования таких преобразователей [7].

2.6.2. Разработка общей теории структур преобразования физических величин

Разработаны основы построения общей теории синтеза и эквивалентных преобразований структур *параметрических* инвариантных нелинейных систем преобразования величин. Построена структурно-топологическая теория таких систем, охватывающая системы с абсолютной инвариантностью, с инвариантностью до ϵ и порожденные ими итерационные системы. Выполнен синтез *полного* множества структур с двумя и тремя сумматорами [8].

На основе выдвинутых принципов однозначного аналитического решения систем нелинейных уравнений с управляемыми параметрами разработан метод синтеза общих структур *тестовых* систем прямого инвариантного преобразования скалярных величин. Разработана концепция построения полной прогнозирующей иерархической системы знаний в области структур нелинейных тестовых систем, организованной в форме естественной классификации [8]. Разработаны принципы построения и реализована первая редакция программного продукта, ориентированного как на отыскание основополагающих идей, лежащих в основе класса структур, так и на предельно формализованный синтез полного множества решений в подклассе [9].

Разработаны основы выявления и систематизации методов осуществления преобразования физических величин (ПФВ) и других целенаправленных процессов (измерения, контроля, управления) с общей позиции организации причинных связей событий. С этой позиции проведен анализ упомянутых процессов, позволивший выявить их принципиальные внутренние взаимосвязи, уточнить



специфику каждого из них, обнаружить ряд проблем и «белых пятен». Выявлена целесообразность рассмотрения в качестве самостоятельной дисциплины знаний, относящихся к процессу ПФВ, определяемому как процесс реализации желаемой функциональной зависимости между величинами. Проанализированы составляющие задачи ПФВ: установление причинной связи величин и уменьшение влияния на нее нежелательных факторов [10]. Определен механизм выявления и систематизации методов путем построения классификаций, отражающих как содержание этих методов, так и их происхождение и взаимосвязи [10]. Создана перспектива для дальнейшей систематизации знаний в области ПФВ и других релевантных процессов.

3. СОЗДАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

3.1. Лаборатория систем логического управления

(заведующий д-р техн. наук А.А. Амбарцумян, ✉ ambar@ipu.ru)

Начиная с 1999 г., основные усилия в этом научном направлении были сосредоточены на разработке теоретических основ событийного моделирования (СМ) объектов автоматизации и разработке на основе СМ методов проектирования систем управления технологическими процессами. В 2000—2008 гг. были разработаны концепция и методы управления информационными и материальными потоками на основе событийных моделей объектов автоматизации.

Выдвинута концепция, разработаны и исследованы основные понятия логического управления по схеме замкнутого контура: набор событийных моделей, включая модель агрегата, модель технологического процесса и модель структуры производства — технологическую сеть (ТС), достаточные для имитации структуры и поведения потоковой технологии. Каждая из моделей, наряду с определением структуры компонента, содержит динамическую составляющую — жизненный цикл. Он определяет набор технологически востребованных состояний компонента и событийную динамику. В предложенных моделях, атрибутах и жизненных циклах достаточно информации для событийного моделирования технологического объекта [1, 2].

Разработана схема управления технологическими процессами производств поточного типа на основе событийного моделирования, в которой вся функциональность системы управления направлена на обслуживание запросов процессов (по их моделям, «встроенным» в систему управления), т. е. на обеспечение выполнения динамики их жизненных циклов. Проведенное сравнение пред-

ложенной схемы с традиционным «функционально-групповым управлением» показало ее преимущества, как в смысле сложности, так и в смысле технологичности программирования [3].

В целях повышения надежности оперативного управления технологическим процессом, автоматизированного контроля, координации служб и технических работ на объекте предложена концепция управления на основе активных технологических сценариев. Разработаны формальная модель технологического сценария и метод создания сценариев. Разработана модель диалога АСУ с персоналом. Событийная модель объекта и процессов, модель сценариев и модели диалогов объединены в сложносоставной событийной модели объекта автоматизации [4, 5].

На основе предложенной сложносоставной событийной модели объекта управления *разработана новая схема управления*, в которой сценарии используются как программы достижения технологических целей производства и обеспечивают совместно с событийными моделями переход от текущего состояния объекта к требуемому. Показано, что такое решение позволяет переложить ряд функций управления с человека на автоматизированную систему, а именно: контроль состояния оборудования, реакция на события, многошаговое управление, обеспечение и соблюдение режимов, координация работ и контроль соблюдения технологии [6].

Сформулированы принципы построения систем управления технологическими процессами, защищенными от ошибок персонала (НЕР-системы — human errors protected system). В качестве логической основы НЕР-систем управления процессами предложена схема функционирования и управления автоматизированного производства на основе сложносоставной событийной модели. Распределение функций управления между персоналом в рамках сложносоставной событийной модели позволяет повысить эффективность управления и безопасность ведения процессов путем ограничения человека в контуре управления в рамках только тех действий, которые от него ожидаются в конкретной ситуации [7].

Показана эффективность применения логических методов и моделей в задачах снижения аварийности потенциально-опасных объектов (аэрокосмических, энергетических, в объектах уничтожения химического оружия, в нефтегазодобывающих предприятиях и др.). Так, при проектировании системы противоаварийной защиты (ПАЗ) объекта управления центральная задача заключается в выборе состава и числа датчиков контроля в целях своевременного обнаружения и ликвидации развития аварийных ситуаций (АС) (пожар, взрыв, выброс ра-





диоактивных элементов и др.). Впервые предложен метод обеспечения разработчика системы ПАЗ полным множеством вариантов выбора датчиков, причем каждый вариант гарантирует полноту контроля процесса развития заданной АС [8].

Разработан метод снижения аварийности объектов с поточной технологией (тепловые сети, нефтегазодобывающие предприятия и др.) на основе применения логических методов и моделей. Согласно этому методу транспортная сеть объекта структурируется на каналы перемещения материалов, моделируется системой логических функций, и затем строится схема управления не отдельными исполнительными механизмами, а целыми каналами. В этом случае правильное взаимодействие каналов в процессе эксплуатации можно обеспечить на этапе проектирования транспортной сети путем дополнения к логическим моделям каналов специальных логических блокировок, что устраняет возможность возникновения ложных путей и каналов в транспортной сети, а также обеспечивает корректное взаимодействие одновременно действующих каналов, тем самым снижает аварийность функционирования таких объектов [9].

Разработана и исследована новая модель структурированной динамической дискретно-событийной системы ($СД^2С^2$), определен ее состав. Исследован вопрос существования супервизора. Сформулированы и доказаны условия управляемости в рамках $СД^2С^2$ заданной спецификации поведения объекта управления. Сформулированы основные этапы технологии проектирования логического управления на основе модели анализа управляемости с помощью разработанного метода синтеза супервизора. Полученные результаты служат теоретической базой для проектирования супервизорного управления множеством автономных компонентов технической системы [10].

3.2. Лаборатория эффективности и надежности управляющих параллельных вычислительных систем (заведующий д-р техн. наук В.В. Игнатущенко, ✉ ignatu@ipu.ru)

С конца 1990-х гг. исследования в этом научном направлении в основном сосредоточены на решении проблемы динамического управления *надежным* выполнением сложных наборов взаимосвязанных задач на основе математического (статического) прогнозирования времени их реализации в управляющих параллельных вычислительных системах (ВС) реального времени [1]. Под *надежным* выполнением конкретного набора задач, задаваемого пользователем, в параллельной ВС понимается выполнение задач набора за время, не превышающее заданное (пользователем) дирек-

тивное время T_{\max} с требуемой (удовлетворяющей пользователя) вероятностью [1, 2].

На основе современного математического аппарата обрывающихся марковских процессов, математической статистики и теории массового обслуживания, впервые была сформулирована, разработана и продолжает развиваться идеология высокоточного математического прогнозирования времен выполнения сложных наборов взаимосвязанных задач — комплексов взаимосвязанных работ (КВР) — со *случайными* временами их реализации; разработаны оригинальные математические методы, разнообразные (по точности и машинным затратам) алгоритмы и программные средства прогнозирования, формальные правила формирования и использования статических таблиц прогнозов для времен реализации каждого конкретного, задаваемого пользователем, КВР и (или) его фрагментов [3].

Были впервые разработаны формально обоснованные принципы и продолжают исследоваться методы динамического управления выполнением КВР на основе разработанных методов прогнозирования и *динамического* уточнения формируемых *статических* прогнозов в процессе реализации КВР. Разработана общая формальная методика и конкретные алгоритмы динамического управления выполнением КВР на основе статических таблиц прогнозов, в частности — для КВР с логическими ветвлениями как внутри задач, так и между задачами [1, 4].

Естественным продолжением указанных исследований является разработка *новой компьютерной технологии для управляющих параллельных ВС* [2, 5, 6]: обеспечение надежного выполнения КВР в режиме реального времени методами *интеллектуального* динамического управления *резервированными* взаимосвязанными параллельными процессами на основе не только математического прогнозирования, но и на основе перманентного анализа состояний процессов, динамического уточнения и оперативного использования статических прогнозов в процессе реализации задач в параллельной ВС, в частности, — условиях их сбоев или отказов ее вычислительных ресурсов. Динамическое управление надежным выполнением КВР названо *интеллектуальным*, поскольку алгоритмы управления процессами должны оперативно подтверждаться или переназначаться (в режиме реального времени) по многокомпонентному критерию, включающему в себя или учитывающему более 10 системных, структурных и программных параметров и факторов процессов выполнения КВР [5]. К настоящему времени разработаны унифицированная методология реализации предло-



женной компьютерной технологии, основные математические модели процессов выполнения КВР, структурированы и формализованы этапы использования таблиц прогнозов при выполнении произвольного КВР в ВС и пр. [5, 6].

В настоящее время упомянутая технология интенсивно развивается в направлении разработки и исследований различных методов и средств *резервирования программных модулей* (работ) КВР [5—8]. Разработаны оригинальные математические модели — графовые и систем массового обслуживания — представления и реализации различных вариантов синхронного и асинхронного резервирования работ КВР [6]. Формально обоснована, синтезирована и логически описана структура унифицированного (для различных методов и вариантов резервирования) программного блока диагностирования для определения «координаты» *одиночной* неисправности (номера неисправного процессора ВС), ее типа (сбой или отказ) и идентификатора работы КВР с искаженными результатами ее выполнения [7].

Впервые разработаны оригинальные принципы и формализована методика (комплекс математических моделей, алгоритмических и программных средств) организации *адаптивного* (настраиваемого в динамике по реальным событиям в системе) резервирования работ КВР в условиях одиночных ошибок процессоров параллельной ВС [8].

Разработан новый формальный подход к оценке отказоустойчивости управляющих параллельных ВС при выполнении *каждого конкретного* КВР со *случайными* временами реализации его программных модулей [8].

3.3. Лаборатория анализа свойств систем сложной структуры

(заведующий д-р техн. наук Б.Г. Волик, ✉ LFVLK@ipu.rssi.ru)

3.3.1. Разработка методов и моделей принятия решений при управлении противоборствующими силами в условиях неполноты информации

Разработаны структура систем имитационного моделирования военно-технических систем с различными видами вооружений и методология сравнительной оценки вариантов таких систем, сценарии и методика проведения машинных экспериментов для оценки их эффективности [1].

Разработана концепция двухконтурной системы имитационного моделирования военных действий, которая отличается появлением новых блоков интеллектуализации при выборе решения и созданием новых блоков учета неполноты и недостатка информации военных действий у каждой из противоборствующих сторон. Предложены алго-

ритмы принятия решений в условиях информационной неопределенности.

Разработана концепция автоматизированной системы поддержки принятия решений, методология оценки, сравнения и выбора наиболее предпочтительных решений из множества вариантов, полученных при моделировании различных ситуаций.

На базе теории полумарковских процессов и уравнений динамики боя разработаны математические модели функционирования боевых систем. Для решения задачи прогноза и расчета средних значений показателей боевых действий использованы методы статистического моделирования. Для выбора решения при планировании операции по результатам статистического моделирования разработан алгоритм выработки решения по векторному критерию.

3.3.2. Развитие теории и разработка методов анализа эксплуатационной работоспособности систем сложной структуры

Развита теория моделирования надежности и безопасности сложных систем динамическими деревьями отказов, событий. Разработана методология агрегирования статических и динамических моделей анализа надежности и безопасности на основе деревьев отказа, событий; методы декомпозиции системы на основе односвязной и многосвязной структурной декомпозиции, логической декомпозиции, декомпозиции с использованием полной группы несовместных событий для специально выделенной совокупности элементов модели, декомпозиции по «быстрым» и «медленным» процессам для моделирования отказо- и сбоеустойчивых вычислительных систем (ОУВС); новые методы представления и преобразования деревьев отказа, ориентированные на автоматизацию агрегирования статических и динамических моделей надежности и получение ортогональной формы логического описания, минуя общепринятый подход с минимальными путями, сечениями [2].

Разработан ряд динамических надежностных моделей, учитывающих особенности функционирования и отказов систем. В их числе:

модели технологических систем с промежуточными накопителями; модели обработки неисправностей и деградации в ОУВС; модели анализа систем с несовершенным контролем и определения как частных характеристик полноты, глубины и видов отказов контроля, так и интегрального показателя достоверности контроля [3]; модели анализа производительности и эффективности; алгоритмы моделирования случайных событий для статистических моделей надежности; метод опреде-



ления, по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат, оптимального периода функционирования объекта до плановой замены для двух видов стратегии замен с учетом разного рода затрат и потерь при отказах [4]; метод статистического анализа данных по наработкам на основе графоаналитических моделей и получения классов обобщенных распределений для описания распределений по малым выборкам; модель анализа техногенной безопасности систем с защитой; метод вычисления параметра потока отказов и оценка вероятности безотказной работы в логико-вероятностных моделях восстанавливаемых систем; метод вычисления дифференциальных показателей и моментов более высокого порядка, чем первый для наработки до отказа в марковских моделях с «доходами».

3.3.3. Решение проблем информатизации органов управления городским хозяйством

Работы выполнялись совместно с лабораторией автоматизации проектирования и управления многоцелевыми объектами [5]. В результате:

- предложена методология идентификации объектов энергетического хозяйства и разработана общая база данных систем энергетики Москвы;
- разработана система показателей для оценки состояния и развития элементов технологической и инженерной инфраструктуры отдельных предприятий и отрасли коммунального городского хозяйства (КГХ) в целом;
- разработана система классификации материальных объектов КГХ для решения задач учета и управления техническим состоянием объектов;
- разработано алгоритмическое и программное обеспечение для системы учета материальных объектов отрасли теплоэнергоснабжения Москвы;
- разработан метод выбора состава и видов показателей надежности автоматизированных информационных систем КГХ.

3.4. Лаборатория автоматизированных систем массового обслуживания

(заведующий канд. техн. наук М.П. Фархадов, ✉ mais@ipu.ru)

По этому научному направлению развернута программа «АСМО нового поколения», нацеленная на то, чтобы информационное и сервисное обслуживание населения стало более дешёвым, более открытым и доступным широким слоям населения. Ключевую роль в этом направлении призваны сыграть компьютерные речевые технологии — распознавание и синтез речи, идентификация голоса, анализ речевого потока. Речевой портал, реализующий функции самообслужива-

ния в интерактивном режиме и предоставляющий интеллектуальные услуги, способен заменить собой десятки обученных операторов и диспетчеров, что даёт большую денежную экономию и владельцам систем. Основные полученные результаты состоят в следующем.

Разработаны принципы функционирования нового поколения систем массового обслуживания. Сформулированы отличительные свойства таких систем, которые включают в себя принципы открытости, использования сетей общего пользования, элементов естественного языка, многофункциональность, управление надёжностью и доходами. Разработана методология повышения эффективности и открытости систем массового обслуживания путем применения в них речевых технологий [1–3].

Исследованы особенности речевого человеко-машинного интерфейса и созданы модели для его анализа и оптимизации [4–5].

Разработаны модели управления диалогом в системах с распознаванием речи, которые могут быть использованы как при проектировании систем массового обслуживания с речевым интерфейсом, так и при оперативном управлении функционированием таких систем [6–10].

Созданы математические модели для расчета количественных характеристик речевых порталов и для оценки характеристик обслуживания вызовов [7–11].

Сформулированы принципы и разработаны методы обеспечения устойчивости систем обслуживания с ненадежным речевым вводом. Созданы принципы и методы обнаружения и коррекции ошибок в целях обеспечения устойчивости систем обслуживания с речевым вводом [1].

Рассмотрена модель электронного правительства как автоматизированной системы массового обслуживания населения (АСМО). Проанализированы официальные документы, ориентированные на предоставление государственных услуг гражданам. Показана преимуществом топологических и функциональных параметров и критериев современных АСМО и системы электронного правительства [12].

Разрабатываются принципы создания, элементы и описание письменного языка для отображения жестов, используемых для общения людьми с нарушениями слуха [13, 14]. Сформулированы задачи и разработаны принципы управления и математические модели распределением ресурсов с целью оптимизации доходов на основе изучения рыночной ситуации и статистических данных о реализации распределяемого ресурса [15].



3.5. Лаборатория технической диагностики и отказоустойчивости

(заведующий д-р техн. наук М.Ф. Каравай, ✉ mkaravay@ipu.ru)

Предложено и исследовано новое семейство фигурно-решетчатых графов как моделей структур вычислительных систем и систем связей. Впервые предложено представление циклов в n -мерных гиперкубах в виде последовательности номеров измерений. На этой основе разработана классификация гамильтоновых циклов в гиперкубах и в графах Кэли. Разработан и исследован метод построения гамильтоновых циклов в двоичных гиперкубах с неисправными ребрами. Исследованы вопросы организации максимальных циклов в неисправных гиперкубовых структурах вычислительных систем [1].

Для моделей цифровых систем, заданных в виде целевых графов, впервые предложена и разработана математическая теория отказоустойчивости, основанная на нахождении групповых инвариантов графов отказоустойчивых систем. Доказано, что для k -отказоустойчивости n -вершинного графа его минимальное расширение до $(n + k)$ -вершинного графа должно иметь порядок группы симметрии пространства не ниже $n + k$. Разработаны алгоритмы построения отказоустойчивых графов, основанные на нахождении гамильтоновых циклов, их расширении и вращательной трансляции по группе C_{n+k} или D_{n+k} . Доказана минимальность полученных решений. Разработаны алгоритмы реконфигурации при возникновении отказов, позволяющие достаточно просто найти инвариант, изоморфный исходному целевому графу. При этом сохраняются исходная логическая структура и код задачи, изменяются только адресные таблицы [2–4].

Проведены (и продолжаются) принципиально новые оригинальные исследования по созданию универсальной сетевой структуры, эквивалентной по своим характеристикам полному N -вершинному графу, но имеющей в \sqrt{N} раз меньше связей, чем полный граф. Исследования ведутся на основе комбинаторной теории неполных уравновешенных блок-схем. Результаты позволяют естественным образом отображать структуру решающего поля на любую структуру задачи. Решены проблемы отказоустойчивости и реконфигурации, масштабирования и уменьшения энергопотребления [4–7].

Разработаны принципиально новые методы построения системных сетей для многопроцессорных вычислительных систем на основе комбинаторной теории неполных уравновешенных блок-схем. Эти методы обеспечивают возможность инвариантного (с сохранением маршрутных свойств)

произвольного расширения любых системных сетей [5].

Разработана теория и методы повышения быстродействия локальных сетей и распределенных систем управления путем совмещения процессов вычисления и передачи данных в канале [8].

Выполнены исследования по проектированию логических схем в ПЛИС на основе принципов отказоустойчивой упаковки. Разработаны новые оригинальные алгоритмы реконфигурации ПЛИС при отказе ячеек кристалла.

3.6. Лаборатория системной интеграции средств управления

(заведующий канд. техн. наук Ю.С. Легович, ✉ legov@ipu.ru)

Исследованы принципы построения и разработана структура программно-аппаратного комплекса имитационного моделирования вооруженной борьбы противодействующих группировок. Построена стохастическая модель боевого столкновения противоборствующих группировок, включающая в себя алгоритм расчета соотношения сил группировок, представленных в графическом виде, принятом в штабах вооруженных сил РФ, и систему управления базой данных боевых соединений.

Разработана концепция системы управления процессом имитационного моделирования на основе картографического интерфейса, обеспечивающего взаимодействие имитационной системы непосредственно с офицерами высшего звена без необходимости привлечения операторов.

Разработана методология получения и обработки результатов лазерного зондирования атмосферного воздуха. На основе параметрических методов решения обратной задачи атмосферной оптики разработаны алгоритмы получения количественных оценок концентрации и размеров аэрозольных частиц загрязняющих веществ, источником которых являются выбросы промышленных объектов [1].

Исследована устойчивость алгоритмов измерения параметров атмосферных аэрозолей к влиянию параметров точности и помехоустойчивости измерительного тракта лазерного локатора (лидара). Проведен синтез цифровых фильтров для решения задачи частотной селекции в целях упорядочивания спектра модели и подавления шума в экспериментальных данных, получаемых в процессе дистанционных измерений параметров атмосферных аэрозолей [2].

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований лучших зарубежных образцов технических и программных средств автоматизации управления технологическими объектами разработана концепция построения типовой





системы автоматического управления новыми вакуумными дуговыми электропечами (рис. 2, см. вклейку к с. 42) [3].

Разработан алгоритм косвенного измерения параметров частоты капель расплавленного металла, которые возникают в процессе плавки. Алгоритм обеспечивает минимальное запаздывание, что позволяет применять его в системах прямого цифрового управления процессом плавки [4, 5].

Разработана и исследована структура комплекса технических средств информационно-аналитического центра экологического мониторинга и беспроводной сети сбора информации от территориально распределенных автоматических пунктов контроля (включая каналы сбора и передачи данных). Основу центра обработки составляет трехсерверный кластер с возможностью горячей замены всех узлов серверов. В качестве каналов передачи данных впервые использованы беспроводные каналы на основе технологии WiFi и GSM. Выбранные решения стали типовыми для всех объектов по уничтожению химического оружия и позволили обеспечить безотказную работу систем в течение всего срока эксплуатации объекта [6, 7].

Разработаны методы и средства проектирования беспроводных каналов связи технологии WiFi повышенной дальности, учитывающие конкретные параметры передающих и принимающих антенн, реального рельефа местности и типа подстилающей поверхности. Основу методики составляет разработанная модель радиоканала передачи данных на основе квантовой теории поля [8 — 10].

Разработана цифровая модель переноса загрязняющих веществ в атмосфере с учетом метеословий и рельефа местности. Основу модели составляет разработанный алгоритм численного решения уравнения атмосферной диффузии, обеспечивающий моделирование и расчет концентраций атмосферных примесей антропогенного происхождения при заданных внешних условиях. Алгоритм учитывает изменяющиеся во времени метеорологические параметры (температура, влажность, давление, скорость и направление ветра), оперативно получаемые от метеостанций, расположенных в ближней от источника загрязнения зоне [11].

3.7. Лаборатория распределенных информационно-аналитических и управляющих систем (заведующий канд. техн. наук А.Г. Полетыкин, ✉ poletik@ipu.ru)

3.7.1. Методы и программные средства для распределенных информационно-управляющих систем управления (АСУТП АЭС)

На основе теории нечетких множеств и нечетких интегралов разработан новый метод автоматической генерации правил диагностики технологических процессов. Разработан метод нечеткого ло-

гического вывода для интеллектуальных языков программирования.

Сформулированы принципы, разработана и исследована новая универсальная информационная технология создания информационно-управляющих систем верхнего уровня для АСУТП различного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по надежности, отказоустойчивости и непрерывному режиму работы в течение неограниченного срока [1].

На основе этих результатов разработана система верхнего блочного уровня (СВБУ) для АСУТП АЭС. Общее руководство работами вел академик НАН Грузии И.В. Прангишвили. Разработанная СВБУ интегрирует и координирует работу всех подсистем АСУТП, централизует и архивирует информационные потоки и предоставляет оперативному персоналу АЭС удобные, надёжные и быстрые средства управления АЭС. Система передана заказчику и в настоящее время поставляется в ряд зарубежных проектов АЭС (Иран, Индия, Китай).

В ходе работ был создан ряд новых информационных технологий, которые могут применяться в различных областях, включая предприятия ТЭК, химические и другие производства. К ним, в частности, относятся:

- высоконадёжная операционная система семейства UNIX (аттестована для применения в атомной энергетике, стопроцентная лицензионная чистота, неограниченная гарантия и поддержка, документация, соответствующая ГОСТ);
- рабочее программное обеспечение и конфигуратор — SCADA-система для атомной энергетики (разработана по заказу Минатома, разрешена для применения в системах, важных для безопасности, стопроцентная лицензионная чистота, протестирована тремя независимыми организациями, документация по ГОСТ, открытые исходные коды).

3.7.2. Исследование и разработка корабельных систем управления

Были исследованы и разработаны оптимальные методы программно-аппаратной реализации корабельных систем управления техническими средствами. К этому циклу относятся работы по функционально-топологическому анализу и синтезу корабельных систем управления, по разработке методов динамической реконфигурации сетей, по созданию отказоустойчивых систем с использованием предложенных принципов асимметричного мультипроцессинга [2].

3.7.3. Компьютерные основы структурно-сложных распределенных вычислений с управлением

Сформирован новый научный подход к решению проблем организации распределенных вычислений и процессов управления в глобальных



компьютерных средах на основе оригинальной модели исчисления древовидных структур, а именно: разработаны принципы формирования в ресурсах локальных и глобальных сетей математически однородного функционального пространства, в котором свойство универсальной программируемости распространяется с внутренних ресурсов компьютеров на распределенные вычислительные ресурсы; разработан и обоснован базис программирования свободно масштабируемых распределенных вычислений и процессов управления в сетевой архитектуре «Peer-to-Peer»; разработаны и математически обоснованы модели организации высоконадежных распределенных вычислений в изначально недетерминированных компьютерных средах [3].

Полученные теоретические результаты не имеют аналогов и получены с опережением мирового уровня. Растущий неудовлетворенный спрос на массово доступные распределенные системы обработки и управления позволяет утверждать, что индустриальное воплощение разработанных принципов откроет перспективы возрождения конкурентоспособного отечественного компьютеростроения и выхода на мировой компьютерный рынок.

3.7.4. Дискретная обработка данных

Разработана теория кратных вычислений и найден новый способ их структурной организации — параллельные вычисления во времени. Предложена методология понятийного анализа и контекстная технология обработки данных, позволяющие путем построения понятийной модели предметной области и определения специализированного предметного языка на основе выявления четырех видов отображений понятий, задания форм их выражения и описания семантики каждой такой формы методом математической индукции получать эффективные высокоуровневые формальные спецификации предметной области, имеющие низкоуровневую реализацию на различных вычислительных платформах, а также на основе обобщения декомпозиции дискретных функций на бигруппоидах, позволяющих решать системы линейных уравнений, разрабатывать эффективные методики синтеза формульных представлений, находить оценки достигаемой сложности и определять эффективность низкоуровневой реализации дискретной обработки данных при конечной размерности задачи [4].

3.7.5. Мониторинг и управление крупномасштабными системами

Разработаны кластерные модели и методы ситуационного подхода к управлению крупномасштабными процессами. На их основе сформирована методология экспертного наблюдения как инстру-

мента адаптивного мониторинга крупномасштабных процессов, поддержки принятия и контроля эффективности управляющих решений иерархической структуры (в том числе на микро-, макроуровне и в целом). В обобщенном виде полученные теоретические результаты сформулированы в виде концепции перестраиваемого виртуального управляющего СИГМА-хранилища, осуществляющего системную интеграцию данных в интересах глобального мониторинга и анализа приоритетных объектов, процессов и задач управления [5].

3.7.6. Информационные системы анализа и распознавания изображений для управления медико-биологическими объектами

Создан формальный аппарат, обеспечивающий единообразное и компактное описание изображений объектов; разработана методика формализации и структурирования знаний биологов о диагностируемых объектах (клеточных и тканевых структур), основанная на их структурном, семантическом и параметрическом описаниях; разработан новый метод сегментации цветных изображений разнотипных объектов на основе интерактивного порогового преобразования в пространстве цветовых признаков HSV и RGB; разработан новый метод обработки, анализа и параметризации изображений кометоподобных объектов — «комет» (объектов, синтезированных из флуоресцирующих точек разной яркости), позволяющий автоматически оценивать степень повреждения «ДНК-комет», вызванных канцерогенными факторами окружающей среды [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Руководство секции «Технические средства автоматики и вычислительной техники» Ученого совета Института, опираясь на данные по результатам исследований отдельных лабораторий, провело анализ реальных сфер интересов научных коллективов лабораторий и их потенциальных возможностей. Результаты приведены в таблице.

В строках таблицы перечислены конкретные направления теоретических и прикладных исследований, относящиеся к области технических средств и систем автоматизации. Знаки «+» в клетках таблицы отражают интересы лабораторий к работам по соответствующим направлениям. Совпадение этих интересов к отдельным направлениям говорит о возможности участия групп лабораторий в крупных проектах.

Следует обратить внимание на направления, объединяющие большинство лабораторий:

- системы и устройства измерения;
- системы управления;

Анализ направлений деятельности лабораторий

Направления деятельности	Заведующие лабораториями												
	А.М. Касимов	А.А. Амбарцумян	В.В. Игнатушченко	Б.Г. Волк	С.И. Касаткин	В.Д. Зотов	М.П. Фархадов	М.Ф. Каравай	Ю.С. Легович	А.Г. Поле-тыкин	Б.В. Лункин	Р.Р. Бабаян	В.Ю. Кнеллер
Элементы и датчики	+				+						+	+	+
Приборы					+						+	+	+
Пневмоавтоматика	+												
Надежность			+	+	+		+	+					
Диагностика		+	+		+		+						
Системы измерения	+	+			+				+		+	+	+
Системы контроля		+					+		+		+		+
Системы управления	+	+	+	+			+	+	+				
Вычислительные системы		+	+				+	+	+			+	
Системы телекоммуникаций		+					+		+				
Системы массового обслуживания			+				+						
Системы моделирования		+	+	+			+		+			+	
Системы обучения				+			+		+				

- системы моделирования;
- вычислительные системы.

Приведенные в § 3 основные научные результаты последних 10 лет, имеющиеся в Институте материалы по результатам внедрения, приведенные результаты анализа научного потенциала лабораторий и публикационной активности их сотрудников позволяют утверждать: *лаборатории, входящие в исторически сложившийся пул, удачно дополняют друг друга в смысле системной интеграции и способны к успешному выполнению крупных наукоемких проектов автоматизации объектов национальной экономики*, а практика обсуждения научных результатов в рамках секции Ученого совета Института служит гарантией качества научно-технических решений в проектах.

ЛИТЕРАТУРА

К Введению и § 1

1. Гаврилов М.А. Теория релейно-контактных схем. — М.: Изд. АН СССР, 1950.
2. Трапезников В.А. Принципы построения промышленных приборов автоматического контроля и регулирования // Изв. АН СССР. — 1950. — № 10. — С. 1450—1460.
3. Коган Б.Я. Электронные моделируемые устройства и их применение для исследований систем автоматического регулирования. — М.: Физматгиз, 1963.
4. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. — М.: Госэнергоиздат, 1953.

5. *Карибский В.В., Сотсков Б.С.* Общая государственная система приборов и технических средств автоматизации // Стандартизация. — 1962. — № 10. — С. 10—14.
6. *Сотсков Б.С.* Тенденции и перспективы развития основ построения ГСП // Приборы и системы управления. — 1972. — № 8. — С. 4—7.
7. *Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.А.* Датчики автоматического контроля и регулирования. — М.: Машиностроение, 1965.
8. *Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров, В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков.* — М.: Наука, 1976.
9. *Айзерман М.А.* Пневмоавтоматика и гидравлика (сборник статей). — М.: Наука, 1964.
10. *Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации / Под ред. Г.И. Кавалерова.* — М.: ЦНИИТЭИПриборостроения, 1981.
11. *Прангивили И.В., Виленкин С.Я., Медведев И.Л.* Параллельные вычислительные системы с общим управлением. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. *Прангивили И.В., Амбарцумян А.А.* Научные основы построения АСУТП сложных энергетических систем. — М.: Наука, 1993.
13. *Прангивили И.В., Амбарцумян А.А.* Основы построения АСУ сложными технологическими процессами. — М.: Энергоатомиздат, 1994.

К п. 2.1

1. *Касимов А.М., Шубин А.Н.* Некоторые результаты исследований в области пневмогидроавтоматики // Приборы и системы управления. — 1994. — № 11. — С. 44—46.
2. *Струйные и компенсационные методы измерения покомпонентного расхода текущих сплошных сред / А.В. Ахметзянов, А.М. Касимов, Б.В. Лункин, А.И. Попов // Материалы Росс. конф. с междунар. участием (10—12.11.2008, Москва) «Технические и программные средства управле-*





- ния, контроля и измерения» УКИ'08 / Ин-т пробл. упр. — М., 2008. — С. 254—256.
3. *Радикальное* повышение быстродействия элементной базы резервных систем управления летательными аппаратами / А.М. Касимов, Э.М. Мамедли, А.И. Попов, Л.Т. Чернявский // Датчики и системы. — 2005. — № 4. — С. 29—33.
 4. *Струйная* пневмоавтоматика воздушно-реактивных двигателей в авиационной практике / Г.П. Степанов, А.М. Касимов, Н.В. Вологодский, А.А. Белуков // Избран. труды Междунар. конф. по проблемам управления (29 июня — 2 июля 1999, г. Москва). — М.: Наука. — Т. 2. — С. 220—232.
 5. *Касимов А.М.* Состояние и перспективы развития струйной пневмоавтоматики // Материалы Росс. конф. с междунар. участием (10 — 12.11.2008, Москва) «Технические и программные средства управления, контроля и измерения» УКИ'08 / Ин-т пробл. упр. — М., 2008. — С. 259—260.

К п. 2.2

1. *Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М.* Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. — М.: ЭЛЕКТРОНИНФОРМ, 2005.
2. *Магнитные* и магнитооптические свойства магнитополупроводниковых наноструктур ферромагнетик-полупроводник / В.Е. Буравцова и др. // Физика твердого тела. — 2004. — № 5. — С. 864—874.
3. *Вагин Д.В., Касаткин С.И., Поляков П.А.* Анализ работоспособности датчика магнитного поля на основе микроэлемента кольцевой формы // Датчики и системы. — 2005. — № 11. — С. 24—28.
4. *Частотные* характеристики однослойных анизотропных магниторезистивных наноэлементов / С.И. Касаткин, Д.В. Вагин, О.П. Поляков, П.А. Поляков // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 10. — С. 168—175.

К п. 2.3

1. А. с. 1739402 СССР. Полупроводниковые структуры и методы управления их проводимостью / В.Д. Зотов и др. 1992.
2. Пат. 5742092 USA. Semiconductor Structures, Methods for controlling Their Conductivity and Sensing Elements Based on These Semiconductor Structures / Zotov V.D., et al. 1998.
3. *Зотов В.Д.* Полупроводниковые многофункциональные сенсоры широкого применения (Z-сенсоры) // Chip News. — 1998. — № 4. — С. 22—24.
4. *Зотов В.Д.* Z-термисторы — новый класс температурных сенсоров // Chip News. — 1999. — № 1. — С. 37—39.
5. *Зотов В.Д.* Z-термисторы в приборах и системах контроля, регулирования и измерения температуры // Chip News. — 2004. — № 9. — С. 44—45.
6. *Зотов В.Д., Виноградова Е.П., Миронова П.В.* Теоретические исследования Z-эффекта в Z-термисторах // Датчики и системы. — 2004. — № 5. — С. 18—22.
7. *Зотов В.Д.* Z-термисторы // Электронные компоненты. — 2005. — № 1. — С. 70—71.
8. *Десова А.А.* Принципы формирования диагностически значимых признаков ритмической структуры пульсового сигнала // Проблемы управления. — 2006. — № 1. — С. 69—75.
9. *Бабилов В.М., Панасенко И.М.* Учет человеческого фактора при обеспечении надежности человеко-машинных систем // Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. — М.: КомКнига, 2006. — С. 135—150.

К п. 2.4

1. *Лункин Б.В.* Диагностирование датчиков на объектах контроля и управления // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 11. — С. 183—194.

2. *Викторов В.А., Совлуков А.С., Терещин В.И.* Методы построения радиочастотных однозондовых устройств для многопараметровых и инвариантных измерений // Датчики и системы. — 2004. — № 5. — С. 8—13.
3. *Викторов В.А., Совлуков А.С.* Многозондовые датчики // Датчики и системы. — 2005. — № 3. — С. 57—68.
4. *Лункин Б.В.* Основы теории чувствительных элементов слоистой структуры радиоволновых датчиков // Тр. ИПУ. — М., 2002. — Т. XVI. — С. 7—20.
5. *Лункин Б.В., Мишенин В.И., Криксунова Н.А.* Определение объемного содержания компонентов эмульсии типа «нефть—вода» по параметрам электромагнитного резонатора // Измерительная техника. — 2007. — № 9. — С. 60—65.
6. *Лункин Б.В., Криксунова Н.А.* Определение положения границ раздела слоистых сред с помощью радиочастотного датчика // Датчики и системы. — 2007. — № 1. — С. 8—12.
7. *Совлуков А.С., Терещин В.И.* Радиочастотный метод измерения количественных параметров сжиженных углеводородных газов в резервуарах // Измерительная техника. — 2005. — № 10. — С. 68—71.
8. *Лункин Б.В., Криксунова Н.А.* Определение объемного содержания трехслойных потоков в трубопроводах на основе радиоволнового датчика // Тр. 4-й Междунар. конф. по проблемам управления / Компакт-диск. — М.: ИПУ РАН, 2009. — С. 1448—1453.
9. *Дацко А.П., Лункин Б.В., Фатеев В.Я.* Использование гибридных колебаний для измерения количества жидкости в баках с подвижными вытеснителями // Измерительная техника. — 2008. — № 1. — С. 33—37.

К п. 2.5

1. *Бабаян Р.Р.* Микроэлектронные устройства для обработки непрерывной информации. — М.: Наука, 2003.
2. *Бабаян Р.Р.* Схемотехнические методы повышения термостабильности диодных нелинейных элементов // Датчики и системы. — 2001. — № 10. — С. 33—36.
3. *Бабаян Р.Р.* Технология получения тонких пленок металлических сплавов с аморфной структурой // Датчики и системы. — 2002. — № 2. — С. 28—33.
4. *Бабаян Р.Р.* Оценки погрешности аналоговых умножителей на квадраторах // Датчики и системы. — 2001. — № 4. — С. 22—25.
5. Пат. 2239227 РФ. Многоразрядный сумматор / В.А. Лементуев // Бюл. — 2004. — № 30.

К п. 2.6

1. *Агамалов Ю.Р.* О построении средств измерений на основе принципа адаптации // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 7. — С. 166—179.
2. *Агамалов Ю.Р.* Формализация синтеза пассивных четырехплечих мостовых цепей переменного тока на основе дескриптивного логико-математического подхода // Измерительная техника. — 2008. — № 10. — С. 18—23.
3. *Агамалов Ю.Р.* Метод неравномерной дискретизации сигналов переменного тока с адаптацией к их частотам и его приложение к задачам фильтрации и гармонического анализа // Тр. ИПУ. — 2002. — Т. XVI. — С. 39—47.
4. *Бобылев Д.А.* Эффективное подавление сетевой помехи в измерителях-анализаторах импеданса с широким динамическим диапазоном значений тестового сигнала // Датчики и системы. — 2006. — № 12. — С. 31—36.
5. *Агамалов Ю.Р., Бобылев Д.А., Кнеллер В.Ю.* Виртуальные измерители-анализаторы параметров импеданса // Датчики и системы. — 2004. — № 5. — С. 14—18.
6. *Боровских Л.П.* Использование априорной информации для повышения точности измерения параметров объектов





- с многоэлементной схемой замещения // Датчики и системы. — 2006. — С. 22—25.
7. Попов В.С., Смирнов К.И. Способы компенсации погрешности измерительных преобразователей с помощью комбинированной обратной связи // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 4. — С. 185—203.
 8. Скоморохов В.А. Концептуальные основы построения научной картины мира измерительного приборостроения // Материалы Росс. конф. с междунар. участием (10—12.11.2008, Москва) «Технические и программные средства управления, контроля и измерения» УКИ'08 / Ин-т пробл. упр. — М., 2008. — С. 173—174.
 9. Разбегин В.П., Скоморохов В.А., Фаянс А.М. Подход к построению автоматического открывателя знаний в области преобразовании величин. Основные принципы и требования // Там же. — С. 561—565.
 10. Кнеллер В.Ю. Преобразование физических величин: специфика, связь с другими процессами, пути решения основных задач // Датчики и системы. — 2007. — № 12. — С. 58—67.

К п. 3.1

1. Амбарцумян А.А., Казанский Д.Л. Управление технологическими процессами на основе событийных моделей // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 10. — С. 188—202; № 11. — С. 165—182.
2. Ambartsumian A., Kazansky D. An approach to technological process control systems based on model with technological coalitions // 20th Int. Conf. Systems Engin. (ICSEng'08). Las Vegas, USA. August 19 — 21, 2008. — P. 219—224.
3. Ambartsumian A., Kazansky D. Complex automation of technological processes with involving event model in feedback control scheme // 17th IFAC World Congr., Seoul, Korea. July 6 — 11, 2008. — P. 28—33.
4. Амбарцумян А.А., Браништов С.А. Модели профильного включения персонала в управление сложными технологическими процессами. // Человеческий фактор в управлении / Под ред. Н.А. Абрамовой, К.С. Гинсберга, Д.А. Новикова. — М.: КомКнига, 2006. — С. 110—134.
5. Амбарцумян А.А., Браништов С.А. Формальная модель технологического регламента в АСУТП // Проблемы управления. — 2008. — № 2.
6. Амбарцумян А.А., Браништов С.А. Событийные модели управления технологическими процессами, ориентированные на защиту от ошибочных действий персонала. — М.: ООО «Гринвич», 2006. — 168 с.
7. Амбарцумян А.А. НЕР-истемы управления технологическими процессами — новый тип систем, ориентированный на технологическую безопасность и защиту от ошибок персонала // Проблемы управления. — 2007. — № 3. — С. 35—47.
8. Потехин А.И. Метод нахождения точек контроля для систем противоаварийной автоматике // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 7.
9. Потехин А.И. Логические модели транспортной сети объектов с поточной технологией // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 2.
10. Амбарцумян А.А. Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Материалы Росс. конф. с междунар. участием (10—12.11.2008, Москва) «Технические и программные средства управления, контроля и измерения» УКИ'08 / Ин-т пробл. упр. — М., 2008. — С. 32—56.

К п. 3.2

1. Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю. Динамическое управление надежным выполнением параллельных вычислительных процессов для систем реального времени // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 6. — С. 142—157.

2. Игнатущенко В.В. Новая компьютерная технология: управление надежным выполнением сложных наборов задач в параллельных управляющих вычислительных системах реального времени // Тр. II междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» (РАСО'2004). Москва, окт. 2004. — М., 2004. — С. 395—412.
3. Иванов Н.Н., Игнатущенко В.В., Михайлов А.Ю. Статическое прогнозирование времени выполнения комплексов взаимосвязанных работ в многопроцессорных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 6. — С. 89—103.
4. Игнатущенко В.В., Елисеев В.В. О проблеме надежного выполнения сложных наборов задач в управляющих параллельных вычислительных системах // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 6—18.
5. Игнатущенко В.В., Исаева Н.А., Подшивалова И.Ю. Проблема адаптивного резервирования вычислительных процессов для их надежного выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах // Третья междунар. конф. по проблемам управления (20—22 июня 2006 г.). Пленарные доклады, избранные труды / Компакт-диск. — М.: ИПУ, 2006. — С. 775—781.
6. Игнатущенко В.В., Елисеев В.В., Подшивалова И.Ю. Оценка отказоустойчивости управляющих параллельных вычислительных систем: новый подход // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 6. — С. 166—185.
7. Исаева Н.А. Логический синтез процедур резервирования взаимосвязанных программных модулей в параллельных вычислительных системах // Тр. XXXV междунар. конф. «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе» (IT+SE'2008). Украина, Гурзуф, май 2008 г. — С. 64—69.
8. Игнатущенко В.В., Исаева Н.А. Резервирование взаимосвязанных программных модулей для управляющих параллельных вычислительных систем: организация, новый подход к оценке отказоустойчивости, формализованное описание // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 10. — С. 142—161.

К п. 3.3

1. Буянов Б.Б., Лубков Н.В., Поляк Г.Л. Система поддержки принятия управленческих решений с применением имитационного моделирования // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 43—49.
2. Викторова В.С., Волик Б.Г., Степанянц А.С. Анализ надежности вычислительного управляющего комплекса методом комбинации моделей // Надежность. — 2006. — № 2. — С. 53—59.
3. Викторова В.С., Степанянц А.С. Моделирование и анализ контролепригодности бортовых систем самолетов // Надежность. — 2007. — № 3. — С. 62—71.
4. Лубков Н.В. Оптимизация срока службы оборудования по критерию эксплуатационных затрат // Надежность. — 2008. — № 5. — С. 180—190.
5. Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В., Никишов С.Н. Оценка состояния и функционирования систем энергоснабжения // Надежность. — 2006. — № 5. — С. 151—162.

К п. 3.4

1. Применение распознавания речи в автоматизированных системах массового обслуживания / В.А. Жожикашвили, А.В. Жожикашвили, Н.В. Петухова, М.П. Фархадов // Автоматизация и современные технологии. — 2003. — № 11.
2. Открытые системы массового обслуживания с распознаванием речи / В.А. Жожикашвили и др. // Проблемы управления. — 2003. — № 4. — С. 55—62.



3. *The first voice recognition applications in Russian language for use in the interactive information systems* / V.A. Zhozhikashvili, M.P. Farkhadov, N.V. Petukhova and A.V. Zhozhikashvili // Proc. Of the Ninth International Conference «Speech and Computer» SPECOM'2004. — Saint-Petersburg, 2004. — P. 304—307.
4. *Построение структуры человеко-машинного интерфейса для автоматизированных систем массового обслуживания* / В.А. Жожикашвили и др. // Автоматизация и современные технологии. — 2000. — № 3. — С. 5—9.
5. *Новый человеко-машинный интерфейс для автоматизированных систем массового обслуживания* / В.А. Жожикашвили, А.В. Жожикашвили, Н.В. Петухова, М.П. Фархадов // Тр. ИПУ. — 2000. — Т. IX. — С. 5.
6. *Фархадов М.П., Жожикашвили А. В.* Математическая модель для расчета среднего числа переспросов при компьютерном распознавании речи // Проблемы управления. — 2006. — № 2. — С. 38—41.
7. *Математические модели для выбора сценария в информационных системах с распознаванием речи* / Р.В. Билик, З.П. Мясоедова, Н.В. Петухова, М.П. Фархадов // Тр. междунар. науч.-практич. конф. «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании (ИНФОТЕХ-2007)». — Севастополь: СевНТУ, 2007. — С. 134—136.
8. *Анализ речевого интерфейса при взаимодействии клиента с автоматизированной системой массового обслуживания* / Р.В. Билик, З.П. Мясоедова, Н.В. Петухова, М.П. Фархадов // Под ред. В.А. Жожикашвили. — М.: МАКС Пресс, 2007. — 112 с.
9. *Bilik R., Petukhova N., Farkhadov M.* Creation of mathematical models for research of the speech interface // The Second International Conference «Problems of Cybernetics and Informatics PCI'2008». Sept. 10 — 12, 2008. — Vaku, 2008. — P. 155.
10. *Анализ речевого интерфейса в интерактивных сервисных системах. I* / Р.В. Билик, В.А. Жожикашвили, Н.В. Петухова, М.П. Фархадов // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 2. — С. 80—89.
11. *Петухова Н.В., Фархадов М.П., Троценко А.Ю.* Анализ эффективности голосовой системы самообслуживания с распознаванием речи // Автоматизация и современные технологии. — 2008. — № 10. — С. 21—27.
12. *Вертлиб В.А., Фархадов М.П., Петухова Н.В.*, «Электронное государство» как автоматизированная система массового обслуживания населения. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 116 с.
13. *Создание виртуального сурдопереводчика с применением технологии распознавания речи* / В.А. Вертлиб, З.П. Мясоедова, Н.В. Петухова, М.П. Фархадов // V Всеросс. школа-семинар молодых ученых «Управление большими системами». Региональная конференция молодых ученых. — Липецк, 2008. — Т. 2. — С. 12—13.
14. *Мясоедова З.П., Петухова Н.В., Фархадов М.П.* Сурдосервер на основе речевых и мультимедийных технологий // IX междунар. форум «Высокие технологии XXI века — 2008» / Материалы конференции. — М., 2008. — С. 248—251.
15. *Зутлер И.А., Фархадов М.П.* Стратегия управления сверхбронированием и сверхпродажами // Тр. ИПУ. — 2000. — Т. IX. — С. 54—58.

К п. 3.5

1. *Пархоменко П.П.* Фигурно-решетчатые графы как модели многопроцессорных вычислительных систем // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 3. — С. 169—180.
2. *Каравай М.Ф.* Минимизированное вложение произвольных гамильтоновых графов в отказоустойчивый граф и реконфигурации при отказах. Часть I. 1-отказоустойчивые структуры // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 12. — С. 174—189.
3. *Каравай М.Ф.* Минимизированное вложение произвольных гамильтоновых графов в отказоустойчивый граф и реконфигурации при отказах. Часть II. Решетки и k -отказоустойчивость // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 2. — С. 175—189.
4. *Пархоменко П.П.* Построение максимальных циклов в неисправных двоичных гиперкубах // Автоматика и телемеханика. — № 4. — С. 141—155.
5. *Николаев А.Б., Подлазов В.С.* Отказоустойчивое расширение системных сетей многопроцессорных вычислительных систем // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 162—170.
6. *Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С.* Комбинаторные методы построения двудольных однородных избыточных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 2. — С. 153—170.
7. *Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Подлазов В.С.* Простые методы построения квазиполносвязных графов (симметричных блок-схем) // Пленарные и избранные доклады четвертой междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2008. г. Москва, 27—29 окт. 2008. — М., 2008. — С. 34—42.
8. *Стецюра Г.Г.* Совмещение вычислений и передачи данных в системах с коммутаторами // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 5. — С. 170—179.

К п. 3.6

1. *Журавлева Н.Г.* Обработка сигналов в системе лазерного зондирования // Материалы Росс. конф. с междунар. участием (10 — 12.11.2008, Москва) «Технические и программные средства управления, контроля и измерения» УКИ'08 / Ин-т пробл. упр. — М., 2008. — С. 193—195.
2. *Рождественский Д.Б.* Восстановление непрерывной функции по выборке конечного числа равноотстоящих отсчетов // Радиотехника. — 2006. — № 2. — С. 23—27.
3. *Автоматизация вакуумно-дугового переплава с использованием персональных компьютеров* / С.М. Нехамин, С.В. Мулин, Ю.С. Легович, М.А. Киссельман // Сталь. — 2000. — № 10. — С. 62—67.
4. *Рождественский Д.Б.* Методы экстраполяции на основе алгоритма восстановления непрерывного процесса по конечному числу равноотстоящих отсчетов // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 183—189.
5. *Рождественский Д.Б.* Автоматический регулятор с алгоритмом экстраполяции // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2008. — № 5. — Т. 6. — С. 29—33.
6. *Ефремов А.Ю., Куделин А.Е., Легович Ю.С.* Система визуализации экологической информации объектов уничтожения химического оружия. В кн.: Ивери Варламович Прангишвили: более полувека в науке управления. — М., 2007. — С. 109—116.
7. *Анисимова Н.Г., Ефремов А.Ю.* Оценка состояния атмосферного воздуха в районе объекта уничтожения химического оружия методами теории нечетких множеств // Экологические системы и приборы. — 2009. — № 2. — С. 59—61.
8. *Максимов Д.Ю.* Синтез нейросети для задачи формирования сети беспроводной передачи данных экологического мониторинга объекта уничтожения химического оружия // Нейрокомпьютеры. — 2007. — № 1. — С. 54—58.
9. *Легович Ю.С., Максимов Ю.В., Максимов Д.Ю.* Методы расчета затухания сигнала в беспроводных системах передачи данных с учетом рельефа местности и параметров ан-



тенн // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 2. — С. 180—189.

10. *Легович Ю.С., Максимов Ю.В., Максимов Д.Ю.* LabVIEW в расчетах радиолиний систем передачи данных // Междунар. науч.-практ. конф. «Образование, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» / Сб. докл. — М., 2007. — С. 84—88.
11. *Легович Ю.С., Ефремов А.Ю., Масимов Д.Ю.* Расчет переноса и осаждения аэрозоля в реальном времени // Экологические системы и приборы. — 2008. — № 6. — С. 32—34.

К п. 3.7

1. *Полетыкин А.Г.* Программное обеспечение для АСУТП АЭС ИПУ РАН // Тр. отраслевого семинара «Современные программно-технические средства и технологии в АСУТП». — Обнинск: ФГОУ «ГЦИПК», 2008. — С. 89—98.
2. *Иванов А.И., Лазутина Н.А.* Особенности мониторинга сложных систем управления // Труды второй междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2008) (1—3 октября 2008, г. Москва, Россия). — М., 2008. — С. 196—200.
3. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Управление в графодинамических системах на основе компьютерного исчисле-

ния древовидных структур // Труды второй междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2008) (1—3 октября 2008, г. Москва, Россия). — М., 2008. — С. 33—41.

4. *Выхованец В.С.* Описание семантики контекстно-свободных языков методом математической индукции // НТИ, сер. 2: Информационные процессы и системы. — 2008. — № 7. — С. 6—14.
5. *Стратегическое* управление промышленными предприятиями и корпорациями: методологические и инструментальные средства / А.И. Буравлев, Г.И. Горчица, В.Ю. Саламатов, И.А. Степановская. — М.: Физматлит, 2008. — 176 с.
6. *Программно-аппаратный* комплекс оценки индивидуальной радиочувствительности онкологических больных с использованием метода «комет» / Г.М. Попова и др. // Альманах клинической медицины. — 2008. — Т. XVII. — Ч. 1. — С. 368—371.

*П.П. Пархоменко,
А.А. Амбарцумян,
Ю.С. Легович*



Пархоменко Павел Павлович — д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник ИПУ, специалист в области теории дискретных устройств и систем, комбинаторики и технической диагностики, технической диагностики. С 1964 по 1994 г. зав. лабораторией технической диагностики ИПУ. Председатель секции «Технические средства автоматизации и вычислительной техники» Ученого совета ИПУ. С 1969 г. и до перестройки он организатор и научный руководитель ежегодных школ-семинаров, организатор регулярных всесоюзных совещаний по технической диагностике. Внес основной вклад в становление и развитие методологии технической диагностики как новой дисциплины в теории надёжности. Автор и соавтор более 100 публикаций, награжден медалью «За победу над Германией», орденами Отечественной войны второй степени и Трудового Красного Знамени, а также юбилейными медалями. Член редколлегии журнала «Проблемы управления». ☎(495) 334-90-00.



Амбарцумян Александр Артемович — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией методов проектирования систем логического управления ИПУ. Видный представитель признанной в мире научной школы по теории дискретных устройств и логическому управлению, основанной в Советском Союзе чл.-корр. АН СССР М.А. Гавриловым. Область научных интересов — исследование и разработка моделей, методов и информационных технологий логического управления и системотехника АСУ с приложением к автоматизации управления технологическими и, в том числе, потенциально опасными процессами. Опубликовал 110 научных работ, из них 4 монографии. Член редколлегии журнала «Проблемы управления». ☎(495) 334-87-89, ✉ ambar@ipu.ru.



Легович Юрий Сергеевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией системной интеграции средств управления ИПУ, ученый секретарь секции «Технические средства автоматизации и вычислительной техники» Ученого совета ИПУ. Автор более 100 научных работ по теории построения и методике проектирования многоуровневых информационно-управляющих комплексов. ☎(495) 334-93-61, ✉ legov@ipu.ru.



УДК 004;681.3;681.5

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Н.Н. Бахтадзе, В.А. Лотоцкий

Рассмотрен ряд проблем управления на разных уровнях производственного процесса. Предложены алгоритмы идентификации технологических процессов, основанные на построении виртуальных моделей с использованием цеховых архивов и базы знаний. Представлена процедура ассоциативного поиска для построения виртуальных моделей.

Ключевые слова: идентификация технологических процессов, база знаний, модели ассоциативного поиска, виртуальные анализаторы качества.

ВВЕДЕНИЕ

В то время, когда еще не был официально учрежден Институт проблем управления РАН, научные результаты его предтечи — Комиссии по телемеханике и автоматике — отличались органичным сочетанием блестящих теоретических достижений с достойными прикладными разработками (под водой, в ближнем космосе, в тяжелой промышленности).

Работы по управлению технологическими процессами, наряду с управлением подвижными объектами, стали основой трудов коллектива, который в июне 1939 г. был назван Институтом автоматике и телемеханики.

Среди лабораторий Института выделяется группа лабораторий, научные разработки которых имеют выраженную инновационную направленность в области промышленного производства, их характеризует сочетание строгих математических результатов с практичными инженерными разработками.

Так, в лаборатории, руководимой д-ром техн. наук Э.Л. Ицковичем, создана общая методология текущего анализа, оперативной диагностики и прогнозирования нестационарных многомерных процессов. Разработан метод обнаружения изменений свойств систем в режиме получения текущих наблюдений, предусматривающий совместный анализ изменений в компонентах процесса и в связях между компонентами и основанный на

проверке согласованности изменений в компонентах и связях.

Предложены алгоритмы анализа систем, описываемых случайными многомерными нестационарными процессами, в которых в неизвестные моменты времени изменяются их свойства. Разработана общая методология экономически обоснованного развития автоматизации производства, опирающаяся на метод анализа текущего уровня автоматизации производства; метод эффективного распределения ограниченных финансовых ресурсов на намечаемые мероприятия по автоматизации; метод обработки экспертных оценок при проведении конкурсов (тендеров) на продукцию, работы, услуги по построению АСУТП, который позволяет исключить субъективные предпочтения при сопоставлении разных средств или систем одного класса и анализировать работу экспертов, их компетентность и объективность; метод оценки эффективности систем автоматизации на всех этапах их жизненного цикла; метод аудита эксплуатируемых АСУТП. Основу методов составляют теория многокритериального выбора, задачи эффективности инновационных проектов, компьютерная поддержка принятия решений.

В лаборатории, возглавляемой д-ром техн. наук Л.Р. Соркиным, разработан и исследован новый принцип создания оптимизационных моделей календарного планирования на основе событийного подхода, предназначенных для построения расписаний смешения нефтепродуктов. В соответствии с этим принципом процесс смешения разделяется



на последовательность определенных этапов и шагов с переменной длительностью. Основное преимущество таких моделей по сравнению с ранее известными состоит в том, что размерность задачи по дискретным и непрерывным переменным существенно ниже. Предложенный подход позволил создавать оптимизационные модели, которые предоставляют возможность определять режимы работы системы смещения так, чтобы отклонения возможной отгрузки приготовленной продукции от заданного графика отгрузки были бы по возможности минимальными.

Выраженная прикладная направленность свойственна решениям задач оптимальной в средне-квадратическом смысле фильтрации и дифференцирования; помехозащищенной идентификации параметров динамических объектов управления; синтеза оптимального по степени устойчивости управления; построения оптимальных по степени устойчивости помехозащищенных адаптивных промышленных регуляторов; комплексного синтеза многомерных алгоритмов управления сложными электрическими и электромеханическими преобразователями энергии; создания аналоговых и цифровых алгоритмов идентификации и управления для нелинейных преобразователей энергии, таких как асинхронный, синхронный и вентильный электропривод, автономный инвертор напряжения (работы лаборатории, руководимой д-ром техн. наук А.М. Шубладзе).

Основные теоретические достижения лаборатории идентификации систем управления в 1960-е гг. состояли в разработке теории *адаптивной* идентификации нестационарных систем, постановке и обосновании *минимаксного (игрового)* подхода к идентификации, синтезе методов и алгоритмов *идентификации и управления* в единой системе (адаптивной замкнутой системе управления с идентификатором — АСИ). В действительности АСИ — одна из немногих реально работающих систем, приближенно, но эффективно реализующих принципы теории дуального управления А.А. Фельдбаума.

Практические разработки поначалу были ориентированы на оценку и повышение точности обработки деталей в машиностроении, но постепенно из задач управления шлифовкой шарикоподшипников выросла проблема стабилизации процесса производства цельнокатаных стальных труб. В 1976 г. эта прикладная разработка группы сотрудников Института совместно со специалистами Первоуральского новотрубного завода была отмечена Государственной премией СССР. Большую роль в этой работе сыграл В.М. Чадеев.

В последующие годы неизменным стержнем научных работ лаборатории были и остаются фунда-

ментальные и прикладные исследования процессов идентификации. Области применения теории расширяются — кроме металлургии, химическая, нефтехимическая и другие отрасли промышленности, транспорт.

В сфере фундаментальных разработок лаборатория, руководимая д-ром техн. наук В.А. Лотоцким, занималась (и концептуально, и алгоритмически) идентификацией динамических нелинейных и нестационарных систем и исследованиями в таких областях, как надёжность (информационная и аппаратурная), резервирование, управление запасами и массовое обслуживание, а также методами имитационного моделирования и их применением к проектированию крупных автоматизированных технологических комплексов.

В последних десять лет разработаны методы синтеза основного контура в линейных системах с неполной информацией о статистических характеристиках внешних возмущений, выполнено исследование вырожденных задач и условий вырожденности линейно-квадратичных задач синтеза для линейных объектов со стационарными возмущениями. Получены условия вырожденности задач синтеза для различных классов сингулярных возмущений с априорно заданной локализацией частотного спектра.

Разрабатываются и внедряются алгоритмы идентификации и управления производственными процессами на различных уровнях производственного управления: от управления технологическими процессами и оперативного управления производством до управления ресурсами производства и маркетингом производимой продукции. Разработаны методы автоматизации управления технологическими процессами на основе синтеза робастно-оптимальных систем и идентификационного подхода к построению внутренних моделей внешних возмущений. Разработаны методы автоматизации управления текущим коммерческим бюджетированием и ценообразованием продукции предприятий с применением методов управления запасами. Созданы методы разработки программ стимулирования сбыта производимой продукции с применением моделей и алгоритмов оптимального планирования инвестиционных проектов.

Методы идентификации нелинейных объектов на основе нечетких алгоритмов ассоциативного поиска представляют собой механизм использования базы технологических знаний предприятия в системах управления реального времени. Алгоритмы, использующие аппарат нечеткой логики, продемонстрировали высокую точность в различных приложениях: идентификации технологических



процессов непрерывных и полунепрерывных промышленных производств (в частности, химических и нефтехимических), энергообъектов.

1. ОСОБЕННОСТИ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Современное производство характеризуется тем, что существенное продвижение в области создания высокотехнологичных программных и аппаратных средств обусловило реальность оперативного и достоверного информационного обеспечения технологического персонала и лиц, принимающих административно-хозяйственные решения. Значительные успехи достигнуты в области средств отображения технологической информации, систем хранения больших массивов технологических данных, систем мониторинга производственной ситуации и поддержки принятия решений на их основе. Значительным и мощным средством оперативного управления явилось создание корпоративных баз знаний, дающих возможность более глубокой проработки текущей технологической информации — как для целей управления, так и для анализа внештатных ситуаций.

Создание единого информационного пространства предприятий и холдингов уже сегодня позволяет преодолеть непродуктивность разделения тактических задач оперативного управления технологическими процессами и стратегических задач управления производством, все еще практикуемого на предприятиях. Практика подтверждает, что для решения задач управления на всех уровнях: уровне проектирования (САПР), уровне программируемых логических контроллеров — ПЛК, АСУТП (в современной терминологии это системы типа SCADA — Supervisory Control and Data Acquisition) или DCS (Distributed Control Systems), систем оперативного управления производством — MES (Manufacturing Execution Systems), наконец, систем класса ERP (Enterprise Resource Planning) — планирование ресурсов предприятия или MRP, или MRP-II (Manufacturing Resource Planning) — планирование ресурсов производства, могут быть использованы одни и те же информационные массивы и применены идентичные алгоритмические средства.

Для формирования единого информационного пространства предприятия необходимо обеспечение корректного обмена данными между разнородными приложениями, гарантирующего мобильную надежную связь всех его подсистем. Существенную проблему представляет доминирование скорости развития информационных технологий над темпом обновления производственного оборудования. Она будет решаться по трем основным

направлениям: *стандартизация, использование связующего программного обеспечения и внедрение глобальных промышленных серверов.*

Текущая технологическая информация, содержание архива (с возможностью восстановления производственных ситуаций прошедших периодов) и содержание базы знаний предприятия предоставляют возможность построения в режиме реального времени моделей любого звена всей цепочки производства и создания на основе этих моделей интегрированной системы управления производством, охватывая как технологический цикл, так и административно-хозяйственный и маркетинговый процессы, относящиеся к логистическому циклу. Результаты моделирования различных участков производственного процесса не становятся элементами сложной модели на более высоком уровне, а лишь формируют для нее значения вектора входной информации. По сути, недостаточность априорной информации об исследуемом процессе компенсируется дополнительными (виртуальными) измерениями. Этот подход к разработке интегрированных систем управления на базе виртуальных анализаторов (ВА) получил название *идентификационного анализа.*

Реальностью сегодняшнего дня на отечественных предприятиях становится сопровождение перевода предприятий на новые технические средства автоматизации разработкой и внедрением систем усовершенствованного управления, таких, которые бы использовали все возможности микропроцессорной техники и приносили заведомо большой технологический и экономический эффект.

Под системами усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП) понимается широкий класс систем от расширенного регулирования (компенсаторы, системы управления соотношением, упредители Смита и др.) до систем многомерного управления крупными технологическими объектами. В состав последних включают наборы виртуальных анализаторов, что позволяет непосредственно управлять товарными качествами продуктов в автоматическом режиме. Среди многочисленных подходов к усовершенствованному управлению наибольшее распространение во многих отраслях промышленности получила технология, основанная на применении прогнозирующих моделей, как эффективнее всего приспособленная для робастного управления крупными объектами со множеством перекрестных связей. В состав СУУТП входят встроенные оптимизаторы, позволяющие оптимизировать работу технологических объектов по экономическим критериям при наличии достаточного числа степеней свободы. Одна из основных тенденций развития СУУТП состоит в распространении более со-





вершенных технологий разработки и поддержки виртуальных анализаторов, использующих современные достижения прикладной статистики, робастного управления и др.

2. СОВРЕМЕННЫЕ ВИРТУАЛЬНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

Особенность функционирования программно-алгоритмических комплексов, называемых *виртуальными анализаторами*, реализующих подход к построению моделей на базе идентификационного анализа, заключается в том, что они осуществляют построение модели конкретного производственного процесса, используя (помимо текущих и архивных данных) модели на других уровнях производственного управления. При этом существенно, что модели на определенном уровне включают в себя результаты моделирования других участков производственного процесса в качестве компонент вектора входной информации. Можно говорить о формировании дополнительных виртуальных измерений, в какой-то мере компенсирующих недостаточность априорной информации об исследуемом процессе.

Различают два аспекта особенностей ВА такого типа. Прежде всего, независимо от моделей и методов, на основе которых они функционируют, посредством идентификационного анализа реализуется адаптивный подход к настройке моделей. При построении таких моделей используется весь спектр опытных данных (оперативных, архивных, ретроспективных — из базы знаний и экспертных заключений, текущих значений параметров моделей на других участках). Далее, в качестве дополнительного источника априорной информации для идентификации исследуемого процесса могут использоваться модели других производственных процессов, и, кроме того, — рекомендуемые управляющие воздействия различных регуляторов (которые, возможно, функционируют только в режиме советчика).

По сути, идентификационный анализ представляет собой расширение идентификационного подхода к построению моделей, ставшее возможным в условиях функционирования на предприятиях распределенных информационных систем [1].

Соответственно, в современных ВА могут быть применены как широкий спектр традиционных алгоритмов и методов анализа данных и теории управления, так и нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы. Если точность и эффективность идентификационного анализа оказываются удовлетворительными согласно выбранному критерию, то полученные с помощью ВА

модели могут быть использованы в реальных системах управления.

Виртуальные анализаторы могут быть использованы и в целях поддержки принятия решений оператором технологической установки — в качестве приложения к системам управления, формирующего прогноз показателей качества выпускаемой продукции в режиме реального функционирования технологического процесса. Рекомендуемые управляющие воздействия или значения необходимых технологических показателей, получаемых посредством мониторинга производственной ситуации, предоставляются оператору либо непосредственно на мнемосхеме системы управления, либо посредством автономного интерфейса. Алгоритмы идентификации, применяемые в современных ВА, основаны на экспертных знаниях. Используются как экспертные знания самого лица, принимающего решение, так и базы знаний производства.

С помощью ВА, основанных на технологических знаниях, реализуется интеллектуальный подход к построению идентификационных моделей. Различают два типа знаний: *декларативные* и *процедурные*, или *процедуральные* [2]. К первому относят описание различных фактов, явлений, наблюдений, формулирование теорий, ко второму — различного рода умения и навыки. Эксперты (люди, овладевшие теорией и навыками в данной области) отличаются от новичков структурой и способом мышления, в частности, стратегией поиска решений [3]. Если человек не является экспертом, он использует так называемый «обратный вывод» (backward reasoning), когда на основе полученной информации о текущем состоянии процесса он перебирает варианты решений и ищет аргументы в пользу того или другого. Эксперту не требуется анализ текущей информации, он использует в процессе принятия решения так называемый «прямой вывод» (forward reasoning), при котором стратегия принятия решений по формированию экспертом управляющего воздействия создается на подсознательном уровне, является невербализуемой. Таким образом, в аспекте *информационного подхода* (computational view of thought) [4] эффективность системы в значительной степени будет определяться квалификацией эксперта и априорной информацией, которой он будет располагать. В рамках такого подхода *знание* определяется как определенный набор реально существующих элементов — символов, которые хранятся в памяти человека, обрабатываются в процессе мышления и определяют поведение. Символы, в свою очередь, могут быть определены структурой и характером межнейронных связей [5].



Процесс обработки знаний в интеллектуальной системе сводится к восстановлению (ассоциативному нечеткому поиску) знания по его фрагменту [6]. При этом знание можно интерпретировать как ассоциативную связь между *образами*. Процесс ассоциативного поиска может происходить либо как процесс восстановления образа по частично заданным признакам (или восстановления фрагмента знания в условиях неполной информации; как правило, именно этот процесс имитируется в различных моделях ассоциативной памяти), либо как процесс поиска связанных ассоциативно с данным образом других образов, привязанных к другим моментам времени (эти образы могут иметь смысл причины или следствия данного образа).

Известны различные схемы ассоциативного поиска [7]. Так, во фреймовых системах задача поиска реализуется в виде сопоставления (matching) фреймов. В семантических сетях поиск осуществляется путем сопоставления фрагментов сети и графа-запроса. Применительно к решению дискретных задач многокритериального выбора эффективным оказался подход, основанный на методе *вербального анализа решений*. В рамках такого подхода производится декомпозиция описания объектов по многим критериям на их частичные описания меньшей размерности, которые предлагаются лицу, принимающему решения, для сравнения (в предположении попарно равных оценок по критериям, не вошедшим в такие описания).

В работе [7] предложена модель, описывающая процесс ассоциативного мышления как последовательный процесс вспоминания на основе применения *ассоциаций* — пары образов, характеризующихся своим набором признаков. Такая модель представляется промежуточной генерацией между моделями нейронных сетей и логическими моделями, используемыми в классических системах искусственного интеллекта.

В настоящей работе предложен подход к формированию поддержки принятия решения об управлении оператором, основанный на динамическом моделировании процедуры ассоциативного поиска.

3. АЛГОРИТМ НЕЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для идентификации сложных нелинейных динамических объектов, таких как технологические процессы непрерывных и полунепрерывных производств, в работе [8] был предложен алгоритм идентификации с непрерывной самонастройкой в режиме реального времени на основе построения *виртуальных моделей*. Алгоритм позволял в режиме советчика корректировать качество основных по-

казателей выпускаемого продукта на основе статистической обработки данных приборных измерений и лабораторного контроля.

В каждый момент времени создается новая модель. Для построения модели формируется временная база данных архивной и текущей технологической информации. После определения прогноза выхода по текущему состоянию объекта эта виртуальная база уничтожается без запоминания.

Линейная динамическая прогнозирующая модель имеет следующий вид:

$$y_N = \sum_{i=1}^m a_i y_{N-i} + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^S b_{js} x_{N-j, s}$$

где y_N — прогноз выхода объекта на момент времени N , x_N — вектор входных воздействий, m — глубина памяти по выходу, n — глубина памяти по входу, S — размерность вектора входов, a_i и b_{js} — настраиваемые коэффициенты.

Оригинальный динамический алгоритм состоит в построении в каждый момент времени аппроксимирующей гиперповерхности пространства входных векторов и соответствующих им одномерных выходов. Для построения виртуальной модели, соответствующей некоторому моменту времени, выбираются векторы, в определенном смысле близкие к текущему входному вектору. Критерии отбора точек могут быть различными. Размерность этой гиперповерхности выбирается эвристически. Далее на основе классического (не рекуррентного) метода наименьших квадратов определяется значение выхода в следующий момент времени.

Такой алгоритм не строит единственную аппроксимирующую модель реального процесса — он строит новую модель для каждого момента времени, будучи при этом эффективным алгоритмом идентификации, поскольку оценки параметров в любой момент времени являются наилучшими в смысле среднеквадратической ошибки. Каждая точка глобальной нелинейной поверхности регрессии получается в результате использования линейных «локальных» моделей.

Критерий отбора входных векторов из архива для построения виртуальной модели в данный момент времени по текущему состоянию объекта состоял в том [2], что на первом шаге выбиралась точка (S -мерный вектор входов, где S — число анализируемых агрегатов), для которой модуль разности первой компоненты и, соответственно, первой компоненты текущего входного вектора принимал минимальное значение по всему массиву архива входов. Далее из ранжированных по убыванию модулей разностей первых компонент выбиралась точка в пространстве входов, для которой мини-





мальное значение принимал модуль разности вторых компонент, и так далее. По такой схеме отбирались R точек, $R \geq S$, без гарантии, что получаемая система линейных уравнений будет иметь решение.

В целях преодоления проблемы разрешимости соответствующей системы уравнений и с целью повышения быстродействия можно применить следующий подход.

Введем в качестве расстояния (нормы в \mathbb{R}^S) между точками S -мерного пространства входов величину

$$d_{N,N-j} = \sum_{s=1}^S |x_{Ns} - x_{N-j,s}|, \quad \forall j = 1, \dots, n,$$

где x_{Ns} — компоненты вектора входов в текущий момент времени N .

В силу одного из свойств нормы («неравенство треугольника») имеем:

$$d_{N,N-j} \leq \sum_{s=1}^S |x_{Ns}| + \sum_{s=1}^S |x_{N-j,s}|, \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

Пусть для текущего вектора входов x_N

$$\sum_{s=1}^S |x_{Ns}| = d_N.$$

Для построения аппроксимирующей гиперповерхности для вектора x_N отберем из архива входных данных такие векторы x_{N-j} , $j = 1, \dots, n$, что для некоторого заданного D_N будет выполнено условие:

$$d_{N,N-j} \leq d_N + \sum_{s=1}^S |x_{N-j,s}| \leq D_N, \quad \forall j = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где D_N может быть выбрано, например, из условия

$$D_N \geq 2d_N^{\max} = 2 \max_j \sum_{s=1}^S |x_{N-j,s}|.$$

Если в выбранной области не наберется достаточного числа входов для применения метода наименьших квадратов, то выбранный критерий отбора точек в пространстве входов можно будет ослабить путем увеличения порога D_N .

Предлагаемая процедура построения аппроксимирующей поверхности обладает более высоким быстродействием по сравнению с обычным

перебором, поскольку величины $d_{N-k} = \sum_{s=1}^S |x_{(N-k),s}|$,

$k = 1, \dots, N-1$, для всех моментов времени, предшествующих N , могут быть на этапе обучения однократно определены и ранжированы, а по мере поступления нового входа этот ряд пополняется новым членом.

Для широкого ряда технологических процессов химического и нефтехимического профиля алгоритм продемонстрировал высокую точность прогнозирования. Однако ряд моментов требовал дополнительных исследований, в частности, возможные методы построения, сортировки и отбора данных, определение структуры модели.

Для повышения быстродействия можно применить способ отбора входных векторов из технологического архива для построения виртуальной модели в данный момент времени по текущему состоянию объекта, имитирующий ассоциативный поиск оптимального решения оператором-экспертом в той или иной производственной ситуации.

Если в качестве расстояния между векторами входов размерности S выбрать сумму модулей разностей их компонент, то текущий вектор входных параметров можно условно как бы окружить «виртуальной оболочкой», т. е. выбрать из архива определенное число входных векторов, расстояния от каждого из которых до текущего входного вектора попадет в определенный диапазон.

4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АЛГОРИТМА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ КАК ПРОЦЕДУРЫ АССОЦИАТИВНОГО ПОИСКА

Вопрос о быстродействии алгоритма на базе виртуальных моделей весьма существенен для обеспечения возможности прогнозирования параметров технологических процессов и зачастую становится ключевым. Для его решения применим подход, основанный на использовании для прогнозирования модели ассоциативного мышления оператора технологической установки.

Рассмотрим, например, следующий подход (аналогичный предложенному в работе [5]) для построения процедуры ассоциативного поиска, имитирующего интуитивное прогнозирование производственной ситуации оператором. По сути, наиболее адекватный прогноз ситуации будет осуществлен тем быстрее, чем скорее будет сформирован из архива набор входных векторов (в произвольные прошлые моменты времени), который и составит виртуальную оболочку текущего вектора входов.

Пусть множества значений технологических параметров (которые являются компонентами вектора входов), а также значения выходов системы в предыдущие моменты времени вместе составляют множество признаков, формирующих образ выхода.



В процессе *ассоциативного вспоминания* используются образы, описываемые определенным набором признаков. Обозначим образ, инициирующий ассоциативный поиск, через P и, соответственно, образ-результат ассоциативного поиска — через R . Пару образов (P, R) назовем ассоциацией A или $A(P, R)$. Множество всех ассоциаций на множестве образов составляет *память* или *базу знаний* интеллектуальной системы.

В нашем случае в качестве начального образа ассоциативного поиска P^a будем рассматривать текущий вектор входов x_N . Конечным образом ассоциативного поиска R^a будет аппроксимирующая оболочка, состоящая из входных векторов из технологического архива, построенная с помощью описанного в § 3 алгоритма. Эта оболочка представляет собой как бы образ текущего входного вектора, посредством которого мы прогнозируем выход. Алгоритм реализует процесс восстановления образа R^a , исходя из начального образа P^a (т. е. процесс ассоциативного поиска) и может быть описан предикатом $\Omega = \{\exists_i(P_i^a, R_i^a, T^a)\}$, где $P_i^a \subseteq P$ и $R_i^a \subseteq R$, T^a — время ассоциативного поиска.

Ассоциативный поиск, принимающий значение *TRUE*, называется успешным, а принимающий значение *FALSE* — неудачным. Ассоциативный поиск $\exists(P^a, R^a, T^a)$, использующий только одну ассоциацию, содержащуюся в памяти интеллектуальной системы (т. е. на первом же шаге выбирающий из архива нужный набор векторов), называется *элементарным ассоциативным поиском* [5].

Для алгоритма, представленного в § 3, этот предикат является высказывательной функцией, утверждающей истинность либо ложность принадлежности текущего входного вектора определенной области в пространстве входов.

Конечно, решение может быть не единственным. В этом случае выбирается любое из них (задача оптимизации пока не рассматривается).

Если не найдется в архиве ни одной гиперповерхности, удовлетворяющей условию (1), можно либо повысить уровень порога, либо для определенной гиперповерхности (образа нашего входного вектора) заменить один из признаков на более подходящий. Формально это означает, что из набора архивных векторов входов исключается «самый плохой» (находящийся дальше всех других от текущего входа в смысле выбранного критерия) и включается другой, более подходящий, и т. д.

Процесс принятия решений оператором об управляющем воздействии в любой момент времени основывается на интуитивном прогнозировании

оператором выхода по состоянию, и его можно представить как ассоциативный поиск (процесс вспоминания) образов, инициируемый начальным входным образом (т. е. значением текущих компонент входного воздействия). В общем случае этот процесс можно представить как ассоциативный поиск, раскладываемый в цепочку элементарных ассоциативных поисков. Можно выделить два вида цепочек [5]:

— с забыванием, когда все образы, восстановленные в результате предыдущих ассоциативных поисков, не учитываются в процессе выполнения текущего ассоциативного поиска; именно такая цепочка возникает в процессе формирования виртуальных моделей;

— с запоминанием, когда начальным образом для текущего ассоциативного поиска служит образ, формируемый с учетом истории поиска на предыдущих этапах. В случае алгоритма, описанного в § 3, в архиве сохраняются координаты используемых на предыдущих этапах аппроксимирующих гиперповерхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены реалии и некоторые тенденции развития методов и алгоритмов управления производственными процессами на разных уровнях — от управления технологическими процессами до эффективной поддержки принятия решений в управлении бизнес-процессами предприятий. Перечисленные разработки характеризуются получением оригинальных научных результатов, не имеющих отечественных аналогов и успешно конкурирующих с зарубежными разработками аналогичной направленности. В частности, рассмотрена методология разработки виртуальных анализаторов для ряда производственных задач, предусматривающая процедуру ассоциативного поиска, основанную на использовании технологических знаний. В качестве важного примера рассмотрены методы разработки интеллектуальных виртуальных анализаторов технологических процессов непрерывного и полунепрерывного типа. Для формирования поддержки принятия решений об управлении оператором технологической установки применяются алгоритмы ассоциативного поиска, содержащие цепочки ассоциаций без запоминания и с запоминанием любой возможной глубины. В последнем случае процесс успешного ассоциативного поиска заметно ускоряется благодаря экспертным знаниям, которыми в процессе реального функционирования непрерывно пополняется база знаний производства.



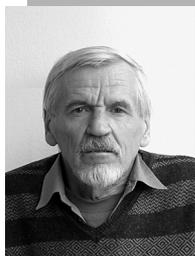


ЛИТЕРАТУРА

1. *Associative Search Models in Industrial systems* / N. Bachtadze, V. Lototsky, E. Maximov, B. Pavlov // IFAC International Workshops Intelligent Assembly and Disassembly (IAD'07) & Intelligent Manufacturing Systems (IMS'07). — Alicante, Spain, 2007. — Vol. 1. — P. 120–126.
2. *Ларичев О.И., Нарыжный Е.В.* Компьютерное обучение процедуральным знаниям // Психологический журнал. — 1999. — Т. 20. — № 6. — С. 53–61.
3. *Patel V.L., Ramoni M.F.* Cognitive Models of Directional Inference in Expert Medical Reasoning / In: Feltovich P., Ford K., Hofman R. (Eds.) Expertise in Context: Human and Machine. — Menlo Parc, CA: AAAI Press. 1997.
4. *Hunt E.* Cognitive Science: Definition, Status and Questions // Annual Review of Psychology. — 1989. — Vol. 40.
5. *Newell A., Simon H.A.* Human Problem Solving. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 1972.
6. *Gavrilov A.V.* The Model of Associative Memory of Intelligent System // The 6-th Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology. Proceedings. — Novosibirsk, 2002. — Vol. 1. — P. 174–177.
7. *Ларичев О.И., Мошкович Е.М.* Качественные методы принятия решения. — М.: Физматлит, 1996.
8. *Системы управления качеством производства минеральных удобрений на основе виртуальных анализаторов* / Н.А. Туманов, Д.Н. Туманов, В.М. Чадаев, Н.Н. Бахтадзе // Автоматизация в промышленности. — 2003. — № 8. — С. 33–36.



Бахтадзе Наталья Николаевна — д-р техн. наук, зав. лабораторией идентификации систем управления ИПУ. Ученый секретарь секции «Системы управления технологическими процессами» Ученого совета ИПУ. Около тридцати лет работает в области адаптивного управления, идентификации систем управления, управления производственными процессами. Автор около 100 научных работ. ☎(495) 334-92-01, ✉ bahfone@ipu.ru.



Лотоцкий Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, зав. отделом идентификации и управления производственно-техническими системами ИПУ. Председатель секции «Системы управления технологическими процессами» Ученого совета ИПУ. Более сорока лет работает в области адаптивного управления, идентификации систем управления, управления запасами. Автор около 200 научных работ. ☎(495) 334-92-01, ✉ lotfone@ipu.ru.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН организует и регулярно проводит следующие научные конференции и семинары

- Всероссийская молодёжная научная конференция по проблемам управления;
- Всероссийская конференция по управлению движением кораблей и специальных аппаратов;
- Международная конференция «Идентификация систем и проблемы управления» (SICPRO);
- Международная научно-практическая конференция «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций»;
- Международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» (PACO);
- Международная конференция «Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в ракетно-космической и авиационной промышленности»;
- Международная конференция по проблемам управления;

(Продолжение на стр. 102)



Т еория и методы разработки программного обеспечения систем управления

УДК 681.5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕШЕНИЙ И СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

О.П. Кузнецов

Рассмотрены результаты, полученные в Институте проблем управления РАН в области интеллектуализации методов управления. Главное внимание уделено методам поддержки управляющих решений в слабоструктурированных ситуациях на основе когнитивных карт. Описаны основные когнитивные модели: линейные и нечеткие модели, сформулированы задачи анализа слабоструктурированных ситуаций на основе этих моделей, даны краткие характеристики методов их решения и программных технологий, разработанных на основе этих методов.

Ключевые слова: поддержка управляющих решений, слабоструктурированные ситуации, линейные когнитивные карты, нечеткие когнитивные карты, интеллектуальные технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья содержит обзор результатов, полученных в Институте проблем управления РАН в области интеллектуализации методов управления. Объем статьи не позволяет подробно описать научное содержание проведенных исследований и дать исчерпывающую библиографию. Будет дана краткая характеристика основных направлений, постановок задач, подходов к их решению и полученных результатов. Эти результаты относятся главным образом к методам и технологиям поддержки управляющих решений в слабоструктурированных ситуациях на основе когнитивных карт. Поэтому в статье им будет уделено основное внимание.

1. 1960 — 1970-е гг. — ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

Первые работы в области искусственного интеллекта появились в ИПУ в связи с проблемой машинного понимания естественного языка. В них была выдвинута идея создания такого исчисления, которое могло бы лечь в основу формализма для интерпретации естественного языка. Эти работы докладывались на международных конференциях и публиковались в зарубежных изданиях [1, 2].

Продолжение работ с пониманием естественного языка было связано с появлением общесо-

юзного проекта «Диалог», одним из инициаторов которого был Л.И. Микулич. Проект представлял общественное объединение программистов, лингвистов и психологов и функционировал на протяжении 15 лет в рамках Научного совета по искусственному интеллекту Комитета по системному анализу при Президиуме АН СССР. К этому моменту появились первые практические результаты, показавшие возможность создания вопросно-ответных систем, использующих естественно-языковой интерфейс [3, 4]. Все эти системы могли работать с предметно-ограниченным естественным языком, который впоследствии А.П. Ершов назвал «языком деловой прозы».

Главная идея, положенная в основу семейства таких систем (известных под именем ДИСПУТ), заключалась в выборе примата прагматики перед всеми остальными стадиями анализа естественного языка: морфологией, синтаксисом и семантикой [5, 6]. Предлагалось сначала задавать весь предметно-ориентированный словарь вместе с онтологией задач и только потом приступать к синтаксическому и морфологическому анализам. При узко ограниченной предметной области и сравнительно небольшом словаре надобность в полноценном морфологическом и частично синтаксическом анализе отпадала, что положительно сказывалось на скорости реакции системы.

До начала 1990-х гг. работы по искусственному интеллекту в ИПУ носили локальный характер.





Серьезный фронт таких исследований возник в 1990-х гг., когда была поставлена проблема управления в слабоструктурированных ситуациях. В этой области, работы в которой продолжаются и в настоящее время, сотрудники Института проблем управления занимают ведущие позиции среди российских исследователей.

2. УПРАВЛЕНИЕ В СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИТУАЦИЯХ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ

Среди задач управления в сферах, связанных с жизнью общества (социально-экономической, организационной, политической и других сферах), наиболее сложными являются комплексные задачи, цель которых — изменить в желаемую сторону положение дел в целом. В этом случае объектом управления является вся проблемная область, которая рассматривается как *динамическая ситуация*, состоящая из множества разнородных взаимодействующих факторов. Некоторые из этих факторов напрямую зависят от решений ЛПР (лица, принимающего решение), другие зависят от ЛПР косвенно (через цепочки других факторов), третьи не зависят от ЛПР вовсе и рассматриваются как внешние возмущения (такие как неблагоприятные погодные явления, виды на урожай, изменения в законодательстве, действия конкурентов и др.). Динамика ситуации выражается в том, что ситуация изменяется с течением времени под влиянием действий ЛПР, внешних возмущений и влияний одних факторов ситуации на другие.

При попытках использования информационных технологий для решения таких задач, как правило, приходится сталкиваться с тем, что — в отличие от большинства технических систем — объект управления (т. е. ситуация) не только не формализован, но и слабо структурирован. Это выражается в следующем.

- Система понятий (факторов) и связей между ними не определена с достаточной полнотой. Разумеется, основные факторы известны, однако многие факторы, связи и параметры выясняются только в процессе постановки задачи.
- Основные параметры ситуации (значения факторов, степень влияния одних факторов на другие) — после того, как они будут выделены — являются не количественными, а качественными, т. е. представляют собой не числа, а либо интервалы, характеризующие точность оценки, либо нечеткие величины, либо вербальные (лингвистические) оценки, образующие линейно упорядоченную шкалу.
- Значения параметров ситуации получены в основном не на основе объективных измерений, а путем опроса экспертов, и потому представляют собой их субъективные оценки. Это относится и к

тем факторам и связям, которые могут быть выражены количественно в результате обработки данных экономической статистики, социологических опросов и т. д., поскольку одни и те же факторы разными источниками оцениваются по-разному. Соответственно, окончательные значения параметров, вносимые экспертом в модель, являются результатом его личной субъективной обработки этих данных, включающей в себя выбор одной из оценок (или их взвешенную свертку), учет достоверности данных, репутацию источника и др.

- Заранее сформулированные альтернативы в такого рода ситуациях отсутствуют; они возникают в процессе их анализа.

Указанные обстоятельства не позволяют при принятии решений в слабоструктурированных предметных областях применять подходы имитационного моделирования, ориентированные на использование количественных объективных оценок, методов традиционной теории принятия решений, опирающейся на методы выбора лучшей альтернативы из множества четко сформулированных альтернатив [7]. Материал, на основе которого принимаются решения в таких областях, неизбежно содержит существенную долю качественных, нечетких, субъективно оцененных данных и по существу является представлением знаний эксперта (или группы экспертов) о ситуации, описывающей проблемную область.

Подход к анализу слабоструктурированных проблемных областей, учитывающий их особенности, сформировался в последние десятилетия. Он основан на понятии *когнитивной карты* и обычно называется когнитивным анализом ситуаций или когнитивным моделированием. Поскольку термин «когнитивное моделирование» в настоящее время связывается в основном с моделированием когнитивных процессов мозга, в дальнейшем мы будем употреблять термин *когнитивный анализ ситуаций*.

Когнитивная карта — это ориентированный граф, ребрам (и, быть может, вершинам) которого поставлены в соответствие веса. Она задается матрицей смежности $W = [w_{ij}]_{n \times n}$, где n — число вершин, w_{ij} — вес ребра (i, j) ; $w_{ij} = 0$ означает, что ребро (i, j) отсутствует. Вершины C_i когнитивной карты соответствуют *факторам (концептам)*¹, определяющим ситуацию, ориентированные ребра — причинно-следственным (каузальным) связям между факторами. Веса ребер графа выражают силу влияния факторов. Кроме того, веса ребер имеют знак «+» или «-», т. е. могут быть положительными или отрицательными. Положительный вес означает, что увеличение значения фактора-причины приводит к увеличению значения фактора-следствия;

¹ В зарубежной литературе наиболее употребителен термин «концепт».



отрицательный вес означает, что увеличение значения фактора-причины приводит к уменьшению значения фактора-следствия. Различные интерпретации вершин, ребер и весов на ребрах, а также различные функции, определяющие влияние связей на факторы (функции агрегации), приводят к различным моделям (модификациям когнитивных карт) и средствам их анализа.

Выбор модели в значительной мере зависит от задач анализа, которые предстоит решать будущим пользователям. Задачи анализа ситуаций на основе когнитивных карт можно разделить на два типа: *статические* и *динамические*. Им соответствуют два типа моделей. *Статический анализ*, или *анализ влияний*, — это анализ текущей ситуации, заключающийся в выделении и сопоставлении каузальных цепочек — путей влияния одних факторов на другие через третьи. *Динамический анализ* — это генерация и анализ возможных сценариев развития ситуации во времени. В обоих случаях цель анализа состоит в формировании возможных альтернатив управляющих решений. Такими альтернативами служат множества управляющих факторов, т. е. факторов, на изменение которых ЛПР может непосредственно влиять.

При постановке задач управления на когнитивной карте используются следующие понятия. *Управляющие факторы* — это факторы, значения которых ЛПР может изменять. Цель управления — достижение определенных значений некоторых выделенных факторов, которые называются *целевыми факторами*. *Внешние, или входные, факторы* — это факторы, на которые не влияют другие факторы когнитивной карты.

Анализ влияний выделяет факторы с наиболее сильным влиянием на целевые факторы, т. е. позволяет определить наиболее эффективные точки приложения управляющих воздействий. Динамический анализ рассматривает развитие ситуации как смену ее состояний в дискретном времени, причем под состоянием ситуации $X(t)$ в момент t понимается набор значений всех ее факторов ($x_1(t), \dots, x_n(t)$) в этот момент. В динамическом анализе решаются две основные задачи. *Прямая задача* — это прогноз развития ситуации при заданных управляющих или внешних воздействиях (изменении значений некоторых управляющих или внешних факторов), т. е. вычисление последовательности $X(1), X(2), \dots, X(n)$ при заданном изменении состояния $X(0)$. *Обратная задача* — вычисление управляющих воздействий, приводящих ситуацию в заданное состояние (например, в состояние, где целевые факторы имеют желаемые значения или близкие к ним).

Можно выделить следующие основные направления в управлении слабо структурированными ситуациями на основе когнитивного подхода.

- Разработка методов анализа когнитивных карт и основанных на них методов поддержки принятия решений.
- Разработка методик структуризации проблемной области, т. е. методик составления когнитивных карт.
- Создание инструментальных средств и информационных технологий, реализующих разработанные методы.

Далее будут кратко охарактеризованы основные результаты, полученные в Институте проблем управления по указанным направлениям.

3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Различные интерпретации вершин, ребер и весов на ребрах, а также различные функции, определяющие влияние связей на факторы, приводят к различным моделям когнитивных карт и средствам их анализа. Наиболее распространенные классы моделей — знаковые графы, линейные модели и нечеткие когнитивные карты.

3.1. Знаковые графы

Основные свойства знаковых графов подробно описаны в известной книге Робертса [8]. *Знаковый граф* — это граф, ребра которого имеют веса $+1$ или -1 , обозначаемые знаками «+» и «-». Первый из них означает положительное, второй — отрицательное влияние. Вес пути равен произведению весов его ребер, т. е. положителен, если число отрицательных ребер в нем четно, и отрицателен, если это число нечетно. Если же от вершины v_i к вершине v_j ведут как положительные, так и отрицательные пути, то характер суммарного влияния фактора v_i на фактор v_j остается неопределенным.

Задача о вычислении влияний определяется так.

Непрямое влияние I_P фактора v_i на фактор v_j через путь P , идущий из v_i в v_j , определяется соотношением

$$I_P = \prod_{(k, l) \in E(P)} w_{kl},$$

где $E(P)$ — множество ребер пути P и w_{kl} — вес (знак) ребра (k, l) в пути P .

Суммарное влияние $T(i, j)$ равно $+1$, если все $I_P > 0$, и равно -1 , если все $I_P < 0$.

Одна из задач анализа знакового графа заключается в анализе его циклов.

Положительный цикл — это контур положительной обратной связи; если факторам приданы некоторые значения, то увеличение значения фактора в цикле ведет к его дальнейшему увеличению и, в конечном счете, неограниченному росту, т. е. к потере устойчивости. Отрицательный цикл противодействует отклонениям от начального состояния и способствует устойчивости, однако возмож-





на неустойчивость в виде значительных колебаний, возникающих при прохождении возбуждения по циклу.

Первые работы в ИПУ по анализу когнитивных карт касались именно знаковых графов. Работа [9] посвящена применению знаковых графов для анализа устойчивости социально-экономических систем. В работе [10] исследовались структурные свойства знаковых графов. Была разработана методика анализа структуры ориентированных знаковых графов и предложены эвристические оценки значимости элементов графа, позволяющие верифицировать веса графа и степени предпочтения факторов, рассматриваемых в системе.

Основной недостаток знаковых моделей — это отсутствие учета силы влияния по разным ребрам и путям, а также отсутствие механизма разрешения неопределенностей при одновременном наличии положительных и отрицательных путей между двумя вершинами. Основной подход к их устранению заключается во введении весов, характеризующих силу влияния, что приводит к линейным или нечетким моделям.

3.2. Линейные модели

Линейные модели и их свойства также подробно описаны в книге [8]. Вычисление их поведения связано с понятием *приращения* $p_i(t+1) = x_i(t+1) - x_i(t)$ значения фактора v_i , которое в линейных моделях принято называть *импульсом*. Приращение вычисляется по формуле

$$p_i(t+1) = \sum_{j \in I} w_{ij} p_j(t),$$

где I — множество всех вершин, из которых ведут ребра в вершину v_i .

Одна из важнейших характеристик линейной модели — *устойчивость*. Вершина v_i называется *импульсно устойчивой*, если ее импульс ограничен, т. е. существует положительное число B , такое, что $|p_j(t+1)| < B$ для всех t . Вершина v_i называется *абсолютно устойчивой*, если ее значение $x_i(t)$ ограничено. Граф называется *импульсно (абсолютно) устойчивым*, если все его вершины устойчивы в соответствующем смысле. Исследование устойчивости проводится в терминах собственных значений матрицы смежности графа. Показано, что граф импульсно неустойчив, если существует собственное значение, превосходящее 1, и абсолютно устойчив тогда и только тогда, когда он импульсно устойчив для любого импульсного процесса и среди собственных значений нет равного 1 [8].

Исследованиям линейных моделей посвящены работы [11, 12]. В частности, в работе [11] предложено два метода стабилизации неустойчивого графа. Первый из них заключается в изменении матриц смежности (введении или удалении ребер) сильно

связных компонентов графа. Сформулированы допущения, при которых задача стабилизации разрешима. Второй метод заключается в построении дополнительного «графа-регулятора», замыкающего обратной связью выходы и входы исходного графа.

В последние годы интерес к линейным моделям связан с постановкой новой проблемы — *игра на когнитивных картах* [13, 14]. В этой постановке «динамика факторов описывается когнитивной картой, причем эта динамика зависит от действий активных субъектов, имеющих, с одной стороны, возможность так или иначе влиять на факторы, а, с другой стороны, заинтересованных в определенных значениях этих факторов» [13].

Недостаток линейных моделей, существенный для приложений, состоит в их «жесткости», т. е. необходимости задавать веса в виде точных числовых значений, тогда как главная особенность слабоструктурированных ситуаций состоит как раз в невозможности получать достоверные числовые оценки весов. Поэтому более адекватной альтернативой линейным моделям служат нечеткие модели.

3.3. Нечеткие модели

Нечеткие когнитивные карты были предложены Б. Коско [15]. В них силы влияния между факторами задаются либо в виде числовых значений из интервала $[-1, 1]$, либо в виде значений, выбранных из лингвистической шкалы (линейно упорядоченного множества лингвистических значений, описывающих возможные силы влияний). Значения факторов также задаются в лингвистическом виде.

Пусть v_{j1}, \dots, v_{jk} — множество всех факторов, входных для фактора v_i (т. е. начальных вершин ребер, входящих в v_i). Тогда в общем случае значение x_i в момент $t+1$ зависит от значений входных факторов в момент t и весов ребер, соединяющих эти факторы с фактором v_i :

$$x_i(t+1) = f_i(x_{j1}(t), \dots, x_{jk}(t), w_{j1,i}, \dots, w_{jk,i}). \quad (1)$$

Выбор функций f_i (*функций влияния, или функций агрегации*), которые в общем случае могут быть различными для разных вершин, определяет конкретную модель. В приложениях обычно рассматривается более простой случай, когда эти функции для всех факторов одинаковы. Это позволяет для решения задач анализа ситуаций применять матричные методы. Такие модели в дальнейшем будем называть однородными. Краткий обзор основных моделей для статических задач приведен в обзоре [16]. Основное внимание исследователей ИПУ направлено на однородную динамическую модель, основанную на приращениях. Она задается следующим образом.



Фактору v_i ($i = 1, \dots, n$) соответствует переменная $y_i(t)$, принимающая лингвистические значения. Множество таких значений линейно упорядочено и образует лингвистическую шкалу $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ir}\}$, где z_{i1} и z_{ir} — минимальный и максимальный элементы множества, а из $k < l$ следует $z_{ik} < z_{il}$. В общем случае у каждого фактора — своя лингвистическая шкала, число элементов r которой определяется экспертным путем.

Вектор $Y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$ называется *состоянием ситуации* в момент t .

Веса ребер — числовые и лежат на отрезке $[-1, 1]$. Они задаются матрицей смежности $W = \|w_{ij}\|$: w_{ij} — вес ребра (v_i, v_j) , если $w_{ij} \neq 0$; ребро (v_i, v_j) отсутствует, если $w_{ij} = 0$. Значение веса w_{ij} характеризует силу влияния фактора v_i на фактор v_j , знак веса — характер влияния (положительное или отрицательное).

Для удобства вычислений определим отображение φ лингвистических шкал факторов на числовой отрезок $[0, 1]$ следующим образом. Для лингвистической шкалы $Z_i = \{z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ir}\}$ разобьем отрезок $[0, 1]$ на r равных отрезков, границы которых обозначим в порядке возрастания $b_0 = 0, b_1, \dots, b_{r-1}, b_r = 1$. Положим $\varphi(z_{ik}) = (b_{k-1} + b_k)/2$ (элемент z_{ik} отображается в центр k -го отрезка).

Отображение $\varphi: Z_i \rightarrow [0, 1]$ позволяет алгоритмы модели сделать числовыми. Обратное отображение $\varphi^{-1}: [0, 1] \rightarrow Z_i$ является гомоморфизмом: точки, лежащие в интервале (b_{k-1}, b_k) , отобразятся в одну точку z_{ik} . С помощью отображения φ состояние ситуации представляется в числовом виде: $X(t) = \varphi(Y(t)) = (\varphi(y_1(t)), \dots, \varphi(y_n(t)))$. Приращение значения фактора v_i в момент $t + 1$ — это величина $p_i(t + 1) = x_i(t + 1) - x_i(t)$. Приращения могут быть отрицательными, поэтому значения p_i лежат на отрезке $[-1, 1]$. Вектор приращений $p_1(t), \dots, p_n(t)$ в момент t обозначим через $P(t)$.

Прямая задача (прогноз развития ситуации при заданном начальном приращении), т. е. вычисление последовательностей $X(1), \dots, X(t), \dots$ и $P(1), \dots, P(t), \dots$ решается с помощью матричного соотношения: $P(t + 1) = P(t) \circ W$, где \circ — правило max-product: $p_i(t + 1) = \max_j (|p_j(t) \cdot w_{ji}|)$.

Таким образом, приращение $p_i(t + 1)$ — это максимальная из величин $|p_j(t)w_{ji}|$, где максимум берется по всем факторам, входным для фактора v_i (для остальных факторов $w_{ji} = 0$).

При получении прогноза наряду с вычислением вектора $P(t + 1)$ вычисляется вектор $C = \{c_1(t + 1), \dots, c_n(t + 1)\}$. Величина $c_i(t + 1)$ называется *консонан-*

*сом*² фактора v_i и определяется следующим образом.

Обозначим через $p_i^+(t + 1)$ максимум положительных приращений, поступающих на вход фактора v_i ; т. е. $p_i^+(t + 1) = \max_j (p_j(t) \cdot w_{ji}), p_j(t) \cdot w_{ji} \geq 0$. Аналогично, $p_i^-(t + 1)$ — максимум абсолютных величин отрицательных приращений, поступающих на вход фактора v_i ; т. е. $p_i^-(t + 1) = \max_j (|p_j(t) \cdot w_{ji}|), p_j(t) \cdot w_{ji} < 0$. Тогда

$$c_i(t + 1) = \frac{|p_i^+(t + 1) + p_i^-(t + 1)|}{|p_i^+(t + 1)| + |p_i^-(t + 1)|}.$$

Консонанс $c_i(t + 1)$ характеризует степень определенности прогноза на момент $t + 1$. Он равен 1, если знаки всех входных приращений одинаковы, и равен 0, если $p_i^+(t + 1) = p_i^-(t + 1)$.

Таким образом, правдоподобный прогноз развития ситуации к моменту $t + 1$ определяется парой: $(X(t + 1), C(t + 1))$, где $X(t + 1)$ — вектор значений факторов ситуации в момент $t + 1$, $C(t + 1)$ — вектор консонанса в момент $t + 1$.

Выбор различных управляющих воздействий (приращений управляющих факторов в начальный момент) приводит к различным прогнозам, т. е. к различным сценариям развития ситуации. Эти сценарии образуют множество альтернатив управляющих решений. Для принятия решений необходимо их оценить в смысле предпочтений ЛПР. Информация о таких предпочтениях лежит за пределами когнитивной модели. Поэтому возникает задача построения интегрированной модели, в которой информация о сценариях была бы объединена с описанием предпочтений ЛПР. Решение этой задачи было предложено в работах [20, 21]. В ней предпочтения ЛПР представляются моделью иерархического оценивания Т. Саати [22]. Предложен метод отображения шкал подмножества V^* факторов когнитивной карты, существенных для оценивания, в шкалы листовых критериев оценочной иерархии, в результате которого значения $x_{ij}^*(n)$ факторов из множества V^* отображаются в значения $\psi_j(x_{ij}^*(n))$ соответствующих листовых

² Пара понятий «консонанс — диссонанс» была введена известным психологом Л. Фестингером [17]. *Диссонанс* по Фестингеру — это ощущаемое человеком противоречие в его системе знаний, мешающее ему принять решение и вызывающее поэтому психологический дискомфорт. *Консонанс* — это отсутствие диссонанса. В анализ когнитивных карт понятие консонанса, по-видимому, впервые введено в работе [18]; оно активно используется в книге Силова [19].



критериев. После этого альтернативы a_i оцениваются по формуле

$$F(a_i) = \sum_j \psi_j(x_{ij}^*(n)) \cdot u_j,$$

где u_j — вес j -го листового критерия, а суммирование ведется по всем факторам из множества V^* , и выбирается альтернатива с максимальной оценкой.

Кроме того, в работе [20] предложена параметрическая оценочная функция, позволяющая учесть в оценках неопределенность прогнозов развития ситуации, полученных с помощью когнитивной карты. Оценочная функция имеет вид:

$$\rho_i = \text{sign}(p_i) |p_i^\alpha| \cdot c_i^\beta.$$

где α и β — параметры, $\alpha, \beta > 0$, p_i — прогнозное значение i -го фактора, c_i — степень неопределенности прогнозного значения p_i (консонанс значения фактора).

Выбор различных параметров α и β позволяет моделировать различные экспертные предпочтения. Например, чем меньше β , тем меньшую роль в экспертной оценке играет консонанс, т. е. тем меньшее значение придает эксперт точности прогноза.

В работах [23—25] показано, что обратная задача для системы нечетких уравнений (описывающих когнитивную карту) с операцией max-product эквивалентна задаче покрытия и, поэтому, является NP-трудной.

Более точно, рассматривается система уравнений S следующего вида:

$$x_1 \cdot a_{11} \vee \dots \vee x_i \cdot a_{i1} \vee \dots \vee x_m \cdot a_{m1} = b_1, \quad (s_1)$$

$$\dots$$

$$x_1 \cdot a_{1j} \vee \dots \vee x_i \cdot a_{ij} \vee \dots \vee x_m \cdot a_{mj} = b_j, \quad (s_j)$$

$$\dots$$

$$x_1 \cdot a_{1n} \vee \dots \vee x_i \cdot a_{in} \vee \dots \vee x_m \cdot a_{mn} = b_n, \quad (s_n)$$

где x_i, a_{ij} и $b_j \in [0, 1]$, а знак \vee означает взятие максимума. Переменная x_i называется *существенной*, если $b_j/a_{ij} \leq 1$ хотя бы для одного s_j , и *несущественной*, если $b_j/a_{ij} > 1$ для всех s_j .

Сведение решения этой системы к задаче покрытия связано с распределением в ней так называемых базовых значений переменных. *Базовым значением* существенной переменной x_i называется величина $\hat{x}_i = \min_{x_i \in s_j} (b_j/a_{ij})$. Базовое значение \hat{x}_i

принадлежит уравнению s_j , если $\hat{x}_i = b_j/a_{ij}$ (т. е. минимум достигается на данном уравнении). Базовое значение \hat{x}_i может принадлежать нескольким уравнениям и, наоборот, уравнение s_j может содержать базовые значения различных переменных.

Показано, что множество решений системы S соответствует множеству покрытий таблицы T , строки t_j которой соответствуют уравнениям s_j , а

столбцы t^i — переменным x_i . Элемент t_{ij}^j таблицы T , расположенный на пересечении строки t_j и столбца t^i , равен единице, если базовое значение \hat{x}_i принадлежит уравнению s_j , и нулю в противном случае. Максимальному решению системы S соответствует максимальное покрытие таблицы T , а минимальным решениям соответствуют безызбыточные покрытия таблицы T .

В работах [23—25] рассмотрены приемы упрощения таблицы T , не изменяющие множества решений, что позволяет понизить трудоемкость решения конкретных задач. Рассмотрены методы нахождения безызбыточных покрытий таблицы T .

В работе [26] рассмотрены динамические качественные карты, в которых состояние каждого фактора определяется качественной шкалой — упорядоченным набором символических значений. Вводится «естественная» целочисленная метрика, в которой расстояние между качественными значениями равно числу значений шкалы, заключенных между ними. Это позволяет ввести в шкале понятие приращений и операций над ними с учетом конечной размерности шкалы.

Допускается использование промежуточных значений шкалы, которые, однако, не локализируются точно. Промежуточное значение определяется парой коэффициентов уверенности, с которой оно может быть соотнесено с соседними значениями шкалы.

Влияния факторов друг на друга выражаются функциями, отображающими качественную шкалу одного фактора в качественную шкалу другого фактора. Шкалы, для которых определение функций влияния возможно без использования промежуточных значений, считаются согласованными. В противном случае они называются несогласованными.

Несогласованность функций влияния, а также конфликты влияний факторов друг на друга приводят к необходимости рассматривать размытые качественные значения факторов. Размытое значение — это совокупность нескольких значений качественной шкалы, каждое из которых обладает своей степенью (оценкой) уверенности. Сформулированы требования к такой оценке и на их основе выбрана оценка, выражающая степень консолидации компонент размытого значения вокруг его естественного центра. Этот центр может считаться наилучшим дефазификатором размытого значения.

4. МЕТОДЫ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЙ, МЕТОДИКИ СОСТАВЛЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Работе с когнитивными картами предшествует процесс их составления. Очевидно, что этот процесс не может быть до конца формализован и в



значительной степени субъективен. С другой стороны, его можно рассматривать как процесс извлечения знаний из эксперта, результаты которого представляются в виде когнитивной карты. Составляющие этого процесса — построение понятийной структуры предметной области (выявление основных факторов и связей между ними), выбор функций агрегации, построение лингвистических шкал (для нечетких карт) и назначение весов ребер.

В работе [27] рассматривается проблема построения понятийной структуры предметной области. Эта структура строится как решетка понятий, основанная на отношении включения понятий по содержанию: понятие A включено в понятие B , если множество признаков понятия B содержится в множестве признаков понятия A . В этом случае понятие B является более общим, чем понятие A . Удаление признаков из понятия приводит к получению более общих понятий, а добавление признаков дает более конкретные понятия. Таким образом, из исходных понятий постепенно строится «понятийный каркас» предметной области. Такая структура оказывается, в частности, полезной при интерпретации результатов анализа когнитивной карты, поскольку она позволяет «свернуть» результаты анализа, полученные в терминах конкретных факторов, выразив их в терминах более общих понятий.

Одним из средств верификации когнитивной карты, т. е. установления ее адекватности предметной области, служит построение объяснений получаемых прогнозов развития ситуации. В работах [28, 29] исследованы вопросы получения объяснений прогнозов в виде трассы движения по дереву вывода. Предложен метод построения объясняющих цепочек, основанный на использовании матрицы прогноза развития ситуации и позволяющий значительно сократить время получения объяснения для любого фактора ситуации при заданном множестве входных факторов.

Технологии построения когнитивных карт для конкретных прикладных задач, относящихся к социально-экономическим проблемам, и связанные с их применением методические вопросы рассмотрены в работах [30–35].

В работе [36] предложен еще один подход (наряду с описанным выше иерархическим методом оценивания [20, 21]) к оценке управленческих стратегий, формируемых на основе анализа когнитивных карт — подход, использующий метод SWOT-анализа [37]. Этот метод заключается в выделении в когнитивной карте четырех групп факторов: с одной стороны, слабых и сильных сторон объекта управления, с другой — возможностей и угроз для объекта, идущих от внешней среды. Оценки управляющих решений производятся в терминах взаимодействия этих групп факторов: использования сильных сторон и объективных

возможностей, минимизации влияния угроз и слабостей объекта на развитие ситуации.

В работе [38] рассмотрены проблемы анализа рисков, которые возникают в результате ошибок экспертов при составлении когнитивных карт, приводящих к неадекватному моделированию реальной ситуации. В ней сделана попытка классификации наиболее типичных ошибок и методов их устранения.

В целом же проблемы верификации и адекватности когнитивных карт, особенно важные в приложениях, не могут быть до конца решены математическими методами. Очень многое зависит от опыта и компетентности экспертов, специфики предметной области. Многие ошибки и неадекватности можно выявить только в процессе эксплуатации когнитивной модели в реальной ситуации.

5. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Первые интеллектуальные системы были разработаны в ИПУ в 1970-х гг. [3–6] и были связаны, как уже отмечалось в § 1, с проблемами понимания естественного языка. Со второй половины 1990-х гг. началось создание программных систем, реализующих описанный выше когнитивный подход к поддержке управляющих решений.

Методы анализа ситуаций и генерации управляющих решений на основе когнитивных карт довольно сложны в вычислительном отношении. Поэтому для карт, содержащих более десятка факторов, эти методы нуждаются в программной реализации. Разработка программных комплексов поддержки принятия решений на основе разработанных методов составляет важную часть проводимых работ.

Первыми разработками в этом направлении были программные комплексы «Компас» [39] и «Ситуация» [40]. В основе системы «Компас» лежит нечеткая когнитивная модель. Система «Ситуация» опирается на линейную модель. Дальнейшим развитием системы «Ситуация» стала система «Курс» [41], включающая в себя четыре взаимодействующих диалоговых комплекса «Ситуация-2», «Компас-2», КИТ, МИОС. Существенным развитием системы «Компас» стала система «Канва» [42].

Функциональные схемы этих систем примерно одинаковы. Все они содержат подсистему ввода когнитивной модели ситуации; подсистему обработки, включающую в себя методы решения прямой и обратной задач; подсистему представления результатов анализа и выдачи рекомендаций по принятию решений. Отличия — иногда существенные — заключаются в применении разных методов анализа ситуаций и оценки управляющих решений и в различных пользовательских сервисах, обеспечивающих общение пользователя с сис-



темой и способствующих правильной интерпретации результатов. Так, в системе «Канва»:

— подсистема ввода содержит графический интерфейс для ввода и редактирования нечеткой когнитивной модели ситуации в виде ориентированного знакового графа, блок ввода шкал и конкретных значений факторов и связей в режиме диалога с экспертом;

— подсистема обработки применяет методы анализа нечетких когнитивных карт, описанные в § 3;

— подсистема представления результатов выдает результаты моделирования в графическом и табличном виде, причем выдаются как вычисленные значения выбранных факторов, так и оценки консонанса, характеризующие степень уверенности в полученном прогнозе.

Кроме того, система содержит:

— подсистему объяснения прогноза, которая генерирует описание последовательных шагов получения прогнозного значения любого фактора ситуации, причем это описание включает в себя как положительные, так и отрицательные пути влияния на заданный фактор;

— подсистему поддержки принятия решений, которая содержит средства поддержки сценарного исследования ситуации (ввод, редактирование, инициацию и просмотр сценариев, возникающих при различных управляющих воздействиях) и советующий блок, который в диалоговом режиме предлагает различные управляющие воздействия при заданном целевом факторе.

В аспекте компьютерной поддержки принятия решений к описанным системам примыкают методы и системы, описанные в работах [43—45], которые, впрочем, основаны на других моделях, и описанные здесь методы интеллектуализации в них не применяются.

Разработанные методы и информационные технологии нашли применение при решении задач управления регионами, выработки технической политики в различных областях народного хозяйства (в здравоохранении, транспорте, торговле и др.), ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и других сферах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когнитивная карта — это модель представления знаний эксперта о ситуации. Эта модель отражает субъективное видение субъектом ситуации (отсюда термин «когнитивный»). Разные субъекты могут построить разные когнитивные карты одной и той же проблемной области, отличающиеся не только значениями и знаками весов, но и набором факторов. В этом смысле можно сказать, что когнитивные карты — всего лишь язык грубого, качественного описания ситуации. Когнитивный

анализ с некоторой уверенностью может обозначить возможные тенденции развития ситуации в результате тех или иных управляющих воздействий, выявить различные побочные эффекты, казалось бы, очевидных решений, однако в принципе не способен дать гарантированные прогнозы. Об адекватности той или иной когнитивной модели можно судить только по результатам ее применения.

В заключение отметим некоторые актуальные направления дальнейшего развития когнитивного подхода:

— моделирование развития и управления развитием динамических ситуаций в условиях ограниченных ресурсов;

— моделирование конфликтных ситуаций, угроз и противодействия угрозам в терминах когнитивных карт;

— структурный анализ когнитивных карт: выявление нежелательных циклов, анализ устойчивости (т. е. робастности — нечувствительности к малым возмущениям) данной ситуации и др.;

— физическое время в когнитивных картах;

— неоднородные когнитивные карты (карты, в которых функции (1) для разных факторов могут быть различными) и методы их анализа;

— методики построения когнитивных карт с помощью типовых структур;

— исследование надежности прогнозирования в когнитивных моделях;

— прикладная адекватность различных моделей когнитивных карт в различных предметных областях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Микулич Л.И., Червоненкис А.Я.* Об использовании формальных исчислений в диалоговых системах // Тр. IV Междунар. объединенной конф. по искусственному интеллекту. — Тбилиси, 1975.
2. *Mikulich L.I., Chervonenkis A.Ya.* On the use of formal calculi in conversational natural language systems // *Firbush News*. — 1976. — N 7.
3. *Mikulich L.I.* Dialogue systems for information retrieval and logical inference // Тр. 11 междунар. югославской конф. «Информатика — 76». — Блед, Югославия, 1976.
4. *Микулич Л.И.* Диалоговая система для ведения непрерывного графика работы флота // «Планирование в транспортных системах: модели, методы, информационное обеспечение»: Сб. трудов ИПУ. 1978. — Вып. 17.
5. *Микулич Л.И., Червоненкис А.Я.* Диалоговая система ДИС-ПУТ: лингвистический и прагматический процессоры // Докл. II Междунар. совещания по искусственному интеллекту (Репино) / НС «Кибернетика». — М., 1980.
6. *Mikulich L.I.* Natural language dialogue systems: a pragmatic approach // In: «Machine intelligence: 10». — N.-Y.: J. Wiley, 1982.
7. *Ларичев О.И.* Наука и искусство принятия решений. — М.: Наука, 1979.
8. *Робертс Ф.С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Пер. с англ. — М.: Наука, 1986.
9. *Кульба В.В., Миронов П.Б., Назаретов В.М.* Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых орграфов // *Автоматика и телемеханика*. — 1993. — № 7.



10. *Марковский А.В.* Анализ структуры знаковых ориентированных графов // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 1997. — № 5. — С. 144–149.
11. *Корноушенко Е.К., Максимов В.И.* Управление процессами в слабоформализованных средах при стабилизации графовых моделей среды // Тр. Ин-та проблем управления. — 1999. — Т. II. — С. 82–94.
12. *Максимов В.И., Корноушенко Е.К.* Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабоструктурированных задач // Тр. Ин-та проблем управления. — 1999. — Т. II. — С. 95–109.
13. *Новиков Д.А.* «Когнитивные игры»: линейная импульсная модель // Проблемы управления. — 2008. — № 3. — С. 14–22.
14. *Куливец С.Г.* Игра на когнитивной карте с импульсным начальным управлением // III Всерос. молодежная конф. по проблемам управления (ВМКПУ'2008): Труды / Под ред. Д.А. Новикова, З.К. Авдеевой. — М.: ИПУ РАН, 2008. — С. 134–135.
15. *Kosko B.* Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. — 1986. — 24. — P. 65–75.
16. *Кузнецов О.П., Кулинич А.А., Марковский А.В.* Анализ влияния при управлении слабо структурированными ситуациями на основе когнитивных карт // В сб.: Человеческий фактор в управлении. — М.: СИНТЕГ, 2006. — С. 330–362.
17. *Фестингер Л.* Теория когнитивного диссонанса. — СПб.: Ювента, 1999.
18. *Sawaragi T., Iwai S., Katai O.* An integration of qualitative causal knowledge for user-oriented decision support // Control Theory and Advanced Technology. — 1986. — Vol. 2. — P. 451–482.
19. *Силов В.Б.* Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. — М.: Инпро-Рес, 1995.
20. *Поддержка* принятия решений в слабо структурированных предметных областях. Анализ ситуаций и оценка альтернатив / А.Н. Аверкин, О.П. Кузнецов, А.А. Кулинич, Н.В. Титова // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2006. — № 3. — С. 139–149.
21. *Кулинич А.А., Титова Н.В.* Генерация и анализ альтернатив управления в слабоструктурированных ситуациях // Третья междунар. конф. по проблемам управления (20–22 июня 2006 г.): Пленарные доклады и избранные труды. — М.: ИПУ, 2006. — С. 298–304.
22. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993.
23. *Марковский А.В.* О связи уравнений типа max-product с задачей о покрытии // Тр. ИПУ РАН. — Т. XX. — 2003. — С. 113–119.
24. *Марковский А.В.* О решении нечетких уравнений типа «max-product» в обратных задачах управления и принятия решений // Автоматика и телемеханика. — 2004. — № 9. — С. 149–159.
25. *Markovskii A.V.* On the relation between equations with max-product composition and covering problem // Fuzzy Sets and Systems. — 2005. — Vol. 153. — P. 261–273.
26. *Markovskii A.V.* Some models of dynamic cognitive maps with qualitative scales of factors values // Proc. of the 17th World Congress of IFAC. Seoul, Korea, July 6 – 11, 2008. — P. 695–699.
27. *Кулинич А.А.* Моделирование динамических процессов в понятийной системе субъекта для генерации креативных решений // Когнитивные исследования: Сб. науч. тр. / Под ред. В.Д. Соловьева. — 2006. — Вып. 1 — С. 94–123.
28. *Кулинич А.А.* Объяснения в системах моделирования когнитивных карт. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте // Сб. тр. IV Междунар. конф. (Коломна, 28 – 30 мая 2007 г.) — М.: Физматлит, 2007. — Т. 2. — С. 483–490.
29. *Кулинич А.А.* Алгоритм объяснения прогнозов развития ситуации в качественных когнитивных картах // Тр. VII междунар. Конф. «Когнитивный анализ и управление развитием ситуации (CASC'2007)» / Под. ред. З.К. Авдеевой, С.В. Ковриги. — М.: ИПУ РАН, 2007. — С. 150–153.
30. *Корноушенко Е.К., Максимов В.И.* Управление ситуацией с использованием структурных свойств когнитивной карты // Тр. ИПУ РАН. — 2000. — Т. XI. — С. 85–90.
31. *Коврига С.В., Максимов В.И.* Технология когнитивного моделирования целенаправленного развития регионов РФ // Тр. ИПУ РАН. — С. 91–103.
32. *Коврига С.В., Максимов В.И.* Применение структурно-целевого анализа развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 39–43.
33. *Максимов В.И.* Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Там же. — 2007. — С. 30–38.
34. *Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И.* Когнитивный подход в управлении // Там же. — С. 2–8.
35. *Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И.* Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) // Управление большими системами. — Вып. 16. — С. 26–39.
36. *Коврига С.В.* Методические и аналитические основы когнитивного подхода к SWOT-анализу // Проблемы управления. — 2005. — № 5. — С. 58–63.
37. *Andrews K.R.* The Concept of Corporate Strategy. — Richard D. Irvin, 1971.
38. *Абрамова Н.А., Коврига С.В.* О рисках, связанных с ошибками экспертов и аналитиков // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 60–67.
39. *Кулинич А.А., Максимов В.И.* Система концептуального моделирования социально-политических ситуаций «Компас» / В сб.: Современные технологии управления. — М.: Фонд «Проблемы управления», 1998.
40. *Максимов В.И., Григорян А.К., Корноушенко Е.К.* Программный комплекс «Ситуация» для моделирования и решения слабоформализованных проблем // Междунар. конф. по проблемам управления (29 июня – 2 июля 1999 г.): Избранные труды. — М., 1999. — Т. 2. — С. 58–65.
41. *Авдеева З.К., Максимов В.И., Рабинович В.М.* Интегрированная система «Курс» для когнитивного управления развитием ситуаций // Тр. ИПУ РАН. — 2000. — Т. XIV. — С. 89–114.
42. *Кулинич А.А.* Когнитивная система поддержки принятия решений «Канва» // Программные системы и продукты. — 2002. — № 3.
43. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка принятия решений. — М.: СИНТЕГ, 1998. — 376 с.
44. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий. — М.: СИНТЕГ, 2005. — 224 с.
45. *Самохина А.С.* Компьютерные методы и средства управления в чрезвычайных ситуациях, обусловленных биологическими факторами: автореф. дис. д-ра техн. наук. — М.: ИПУ, 2008.



Кузнецов Олег Петрович — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией методов интеллектуализации дискретных процессов ИПУ, председатель Научного совета Российской Ассоциации искусственного интеллекта. Председатель секции «Теория и методы разработки программного обеспечения систем управления» Ученого совета ИПУ. Окончил два факультета МГУ — философский и механико-математический. Специалист по теории автоматов, логическому управлению и искусственному интеллекту. Автор около 110-ти научных работ, в том числе двух книг. Член редколлегии журнала «Проблемы управления». ☎(495) 334-76-39, ✉olkuznes@ipu.rssi.ru.

Автоматизированные системы организационного управления и обработки данных

УДК 658.52.011.52:681.322.067

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР

В.В. Кульба, С.А. Косяченко, В.Н. Лебедев

Представлен ретроспективный анализ теоретических и прикладных проблем и задач, связанных с разработкой модульных автоматизированных информационно-управляющих систем социально-экономических и организационных структур. Данные проблемы и задачи исследовались в ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН в течение последних сорока лет.

Ключевые слова: анализ, синтез, структура, модульность, реальное время, информационно-управляющие системы, базы данных, чрезвычайные ситуации, сценарный подход, автоматизация проектирования.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка данного научного направления была начата в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН в конце 1960-х гг. Его актуальность была обусловлена крупномасштабностью работ по созданию и внедрению автоматизированных информационно-управляющих систем (АИУС) в различных областях народного хозяйства в сочетании с полной непроработанностью и отсутствием теоретических основ, моделей и методов формализации и автоматизации разработки систем этого класса. Основной целью исследований стало создание теоретических основ, формализованных моделей и, наряду с этим, методов анализа и синтеза оптимальных модульных систем обработки данных (СОД) в АИУС различного класса и назначения.

На основе единой методологии и сформулированных принципов модульности и типизации разработаны методы формализации, постановки задач, модели, алгоритмы и программы анализа и синтеза оптимальных модульных СОД, обеспечивающие формальный анализ и структуризацию исходной для технического проектирования информации, синтез оптимальной модульной системы обработки данных, определение содержания меж-

модульного интерфейса и оптимального состава программных модулей при заданном информационном обеспечении, оптимальное построение информационного обеспечения, его основных частей и элементов, выбор логической и физической структуры банков данных, информационных массивов, способов их организации, размещения во внешней памяти и др., выбор оптимальных методов контроля и обеспечения достоверности при обработке данных в АИУС различного класса и назначения.

В основу методологии положен принцип последовательного применения адекватных моделей и методов разработки на этапах технического и рабочего проектирования АИУС. Такой подход позволил разработать и применить на практике типовые решения и модели синтеза оптимальных модульных АИУС, конкретизация которых определяется этапами и целями разработки. Типовые методы синтеза основаны на использовании графовых моделей, позволяющих описать множество допустимых вариантов построения элементов системы и их взаимосвязей и обеспечить выбор оптимального варианта.

Принципы, модели и методы анализа и синтеза оптимальных модульных СОД позволяют формализовать, алгоритмизировать и в большинстве слу-



чаев автоматизировать с помощью ЭВМ процесс создания оптимальных модульных систем обработки данных АИУС, что обеспечивает существенное повышение эффективности принимаемых проектных решений [1–7].

1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ МОДУЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Трудности создания формальной методологии проектирования АИУС объясняются: сложностью структуризации систем, реальным масштабом времени функционирования отдельных подсистем и задач, необходимостью оценки и контроля параметров отдельных подсистем и системы в целом, а также характеристик информационного и программного обеспечения; большим числом изменений в постановках задач, требованиях и деталях спецификациях в ходе разработки; сложностью внедрения формальных методов и автоматизации проектирования; недостаточным использованием возможностей типизации разработки, сокращающей в несколько раз затраты на проектирование и внедрение.

Модульный принцип проектирования АИУС связан с процессом синтеза системы как совокупности слабосвязанных компонентов, допускающих их относительно независимую разработку и использование. Проблемы модульного построения, т. е. проблемы разбиения (декомпозиции) системы на подсистемы, задачи на подзадачи, программного обеспечения на отдельные программы и подпрограммы, возникают на различных этапах анализа и синтеза систем управления. При этом подсистема каждого последующего уровня разбиения представляет собой абстрактный компонент (модуль) системы предыдущего уровня, интерпретация которого зависит от рассматриваемой проблемы.

Принцип модульности при проектировании информационного и программного обеспечения АИУС позволяет свести проектирование к оптимальному синтезу функционально независимых отдельных частей (модулей), совместно выполняющих заданные функции системы с требуемой эффективностью, и значительно сокращает затраты на разработку, внедрение и модификацию системы.

Проблема разделения информационного и программного обеспечения АИУС на отдельные модули и их последующего сопряжения является одной из наиболее трудных и слабоформализованных, так как разделение и сопряжение связаны с планированием и организацией работы системщиков и программистов, процедурами их взаимодействия в процессе разработки, отладки, внедрения функциональных задач и обеспечения их заданных технических характеристик (общий объем про-

грамм, число отдельных модулей, надежность работы, стоимость разработки и эксплуатации и т. д.).

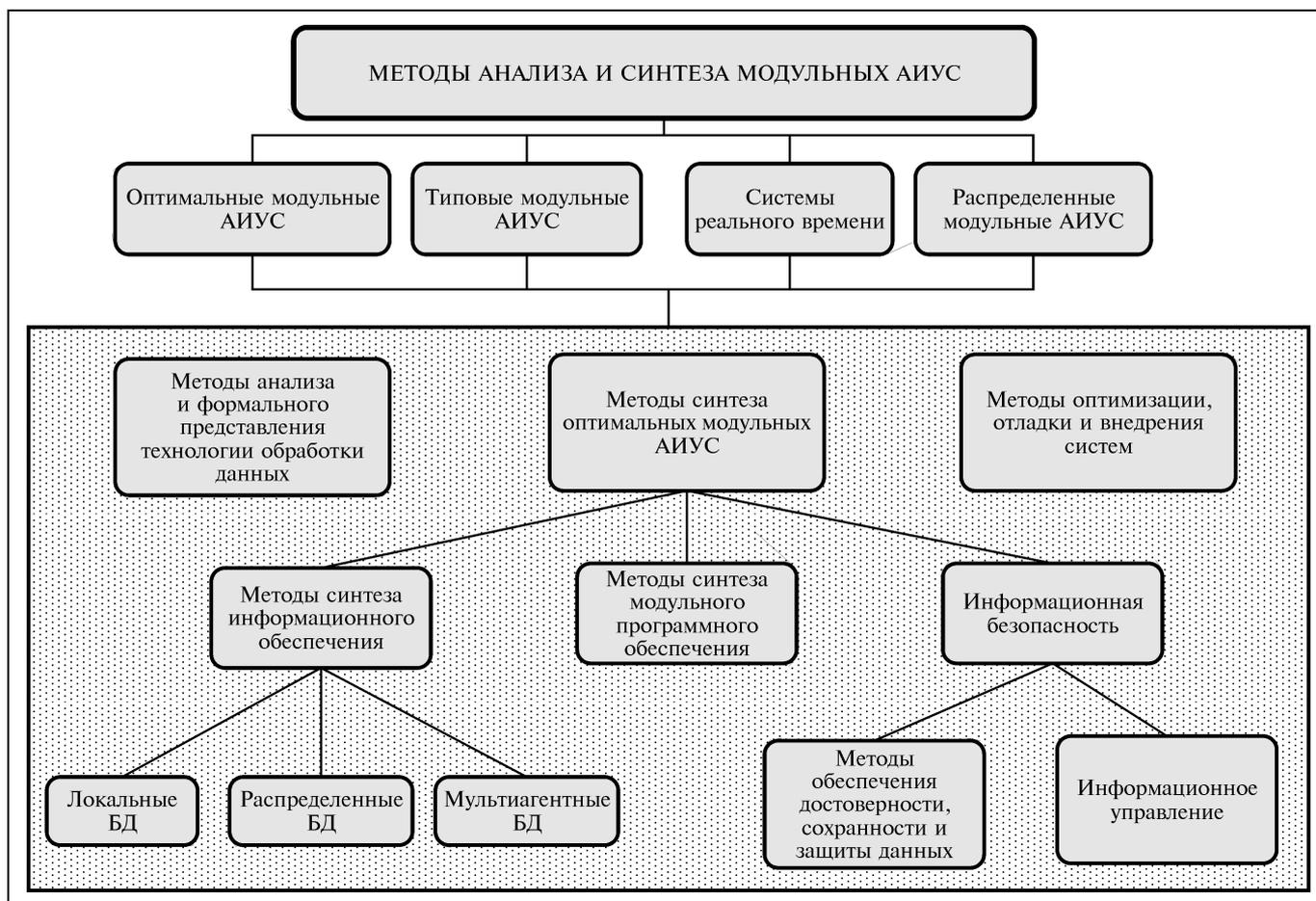
При проектировании модульных систем должны быть обеспечены:

- функциональность (модуль должен содержать функционально законченную и максимально независимую совокупность операций по обработке данных; обращение к модулю осуществляется как к единому целому, и значение вызываемого параметра отражает специфику функций модуля);
- связность (модуль реализует совокупность взаимосвязанных функций, работающих с одними и теми же данными; часть этих данных обычно скрыта для системы в целом);
- алгоритмичность (функции модуля группируются на алгоритмической основе);
- последовательность (модуль включает в себя несколько функций, причем выходные результаты одной функции являются входными для другой);
- маскировка (некоторые функции и данные, которые не должны взаимодействовать с другими модулями, должны быть недоступными, скрытыми для системы в целом; маскировка связана с определением ограничений на доступ и взаимодействие между модулями);
- однородность (в модуль объединяются однородные по своему функциональному назначению процедуры);
- локализация (связана с физической близостью процедур отдельных модулей и информационных элементов, размещаемых на машинных носителях; массивы, записи, страницы являются примерами локализованных элементов).

Проектирование АИУС с модульной организацией программного и информационного обеспечения, имеющих оптимальные характеристики в процессе их создания и эксплуатации, разработка функциональных подсистем на основе модульной методологии обеспечивают сжатые сроки и высокое качество создания таких систем при минимальных затратах труда и средств. Общее время и затраты на разработку с помощью методов и средств анализа и синтеза модульных АИУС сокращаются в 2–3 раза в зависимости от типов, назначения и особенностей создаваемых систем [1, 5, 6, 8–11].

Основой для формализации постановки и решения задач анализа и проектирования оптимальных модульных АИУС служит определение модуля, задач и системы обработки данных, межмодульного интерфейса и технических средств их реализации. Показано, что любое преобразование данных обладает свойством модульности, если оно может быть представлено графовой моделью, вершинам которой соответствуют модули обработки данных, а дугам — информационные связи между ними, определяемые обрабатываемыми перемен-





ными задачи АИУС. Таким образом, многофункциональный модуль АИУС, работающий со многими типами данных, рассматривается как часть системы обработки данных, имеющая интерфейс, определенный таким образом, что каждый модуль не имеет информации о внутреннем содержании других модулей, кроме той, которая содержится в спецификации интерфейса [2, 5].

Методы, представленные на рисунке, обеспечивают:

- проведение формального анализа и структуризацию исходной для технического проектирования информации;
- синтез оптимальной по различным критериям эффективности модульной системы обработки данных;
- определение содержания межмодульного интерфейса и оптимального состава программных модулей при заданном информационном обеспечении;
- оптимальное построение информационного обеспечения, его основных частей и элементов;
- выбор логической и физической структуры банков данных, информационных массивов, способов их организации, размещения во внешней памяти и т. д.;

- выбор оптимальных методов контроля, обеспечения достоверности и сохранности при обработке данных в АИУС различного класса и назначения;
- оптимизацию отладки синтезированных модульных АИУС.

На этапе анализа при создании модульных АИУС общего назначения необходимо проведение комплекса работ. Основная из них — декомпозиция системы на подсистемы (модули), обеспечивающая экстремум заданного критерия разбиения, учитывающего удобство последующего детального анализа, разработки и внедрения АИУС. Одним из наиболее важных критериев выделения подсистем является минимизация числа информационных связей системы. На основе декомпозиции системы выделяются задачи, подлежащие автоматизации; определяются необходимое множество процедур реализации заданного множества функциональных задач и необходимая для этого информация; осуществляется предварительная оценка уровня типизации используемых алгоритмов.

Определение процедур обработки данных, анализ и структуризация самих данных по каждой функциональной задаче базируется на совокупности матричных и графовых моделей, реализация которых обеспечивает подготовку исходных дан-

ных для технического проектирования оптимальных модульных АИУС [1, 3, 6, 8, 9, 12, 13].

На этапе технического проектирования на основе результатов, полученных на предыдущем этапе, синтезируется оптимальная модульная АИУС, т. е. определяются оптимальный состав и число модулей системы, степень использования типовых модулей при их наличии, синтезируется интерфейс и определяется информационное обеспечение. Основные характеристики синтезируемой АИУС являются функциями, определенными на множестве разбиений графа обработки данных.

Основными критериями синтеза модульных АИУС на этапе технического проектирования являются минимум сложности межмодульного интерфейса, минимум времени обмена между оперативной и внешней памятью ЭВМ при решении задачи, минимум объема неиспользуемых данных при пересылках между оперативной и внешней памятью ЭВМ при решении задачи и др.

Для анализа и решения задач данного класса введены понятия точек разрыва модулей первого и второго рода. Каждой точке разрыва ставится в соответствие необходимость обращения к внешней памяти и передачи управления при функционировании системы. Точки разрывов первого и второго рода соответствуют наличию и отсутствию передачи управления другим модулям системы при реализации процедур рассматриваемого модуля [3, 5–7, 9].

В качестве примера задачи синтеза модульной АИУС приведем следующую задачу.

Необходимо выбрать состав модулей (переменные x_{rv}) и состав массивов (переменные z_{lf}), обеспечивающие минимальное общее время обмена с внешней памятью ЭВМ, т. е.

$$\min_{(x_{rv}, z_{lf})} \left\{ \sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V x_{rv} (1 - x_{r+1,v}) \times \left[\tau_v + \sum_{f=1}^F (z_{vf}^c t_f^c + z_{vf}^3 t_f^3) \right] \right\},$$

где τ_v — среднее время считывания v -го модуля из внешней памяти в оперативную память ЭВМ, t_f^c и t_f^3 — времена считывания и записи данных в f -й массив;

$$x_{rv} = \begin{cases} 1, & \text{если } r\text{-я по порядку выполнения процедура} \\ & \text{включается в состав } v\text{-го модуля,} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$z_{lf} = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й информационный элемент} \\ & \text{включен в } f\text{-й массив, } f = \overline{1, F}, F \leq L, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$y_{vl}^{c(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{r=1}^R w_{rl}^{c(3)} x_{rv} \geq 1, \\ 0, & \text{если } \sum_{r=1}^R w_{rl}^{c(3)} x_{rv} = 0; \end{cases}$$

$$y_{vf}^{c(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{l=1}^L y_{vl}^{c(3)} z_{lf} \geq 1, \\ 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L y_{vl}^{c(3)} z_{lf} = 0 \end{cases}$$

при ограничениях на:

- общее число процедур в составе каждого модуля;
- число информационных элементов, обрабатываемых процедурами каждого модуля;
- сложность интерфейса между модулями системы обработки данных;
- сложность информационного интерфейса между отдельными модулями системы обработки данных;
- включение отдельных процедур в состав одного модуля;
- размер записи каждого массива и др.

Существенное развитие методологии синтеза заключается в синтезе модульных СОД реального времени в АИУС [7, 9–11].

Рассмотрены постановки задач синтеза оптимальных модульных СОД реального времени, работающих в режиме разделения времени. Такие системы используются в тех случаях, когда заявки пользователей имеют равные приоритеты на обработку, а задачи обработки данных, необходимые для их обслуживания, слабо взаимосвязаны между собой по используемым процедурам и информационным элементам. В таких случаях входной поток заявок может быть описан как сумма элементарных входных потоков, а алгоритмы диспетчеризации заявок на их обслуживание принадлежат к классу бесприоритетных (см. табл.).

Перечислим основные ограничения, налагаемые при постановке и решении задач синтеза [7, 11, 14] на:

- время ξ_i обслуживания заявки:

$$E_j^i(a_i) < T_i; \quad i = \overline{1, I}; \quad i \text{ — фиксировано;}$$

- устойчивость режима функционирования системы

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i a_i < 1;$$

- общее число дублируемых процедур

$$\left(\sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V \sum_{r=1}^R b_{lr} x_{rv} \right) - R \leq \overline{M}_{\text{пр}};$$



- число процедур в модуле

$$1 \leq \sum_{r=1}^R x_{rv} \leq \overline{M}_v; \quad v = \overline{1, V};$$

- дублирование информационных элементов в массивах

$$\sum_{f=1}^F z_{lf} < k; \quad l = \overline{1, L};$$

- число информационных элементов в каждом массиве

$$\sum_{l=1}^L z_{lf} < \overline{M}_f; \quad l = \overline{1, L};$$

- однократность включения процедур в программные модули

$$\sum_{v=1}^V z_{rv} = 1; \quad i = \overline{1, I};$$

- интерфейс между отдельным модулем и другими модулями задачи

$$\sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V (\gamma_{lv}^{ic} \vee \gamma_{lv}^{is})(\gamma_{lv'}^{ic} \vee \gamma_{lv'}^{is}) < S_v^i,$$

v' — фиксировано;

- число информационных элементов, используемых модулями задачи,

$$\left(\sum_{l=1}^L \gamma_{lv}^{ic} \vee \gamma_{lv}^{is} \right) < D_v^i; \quad v = \overline{1, V},$$

$$\bigcup_{v=1}^V D_v^i = D_i,$$

где

$$\gamma^{ic(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{r=1}^R w_{rl}^{ic(3)} b_{ir} x_{rv} \geq 1, \\ 0, & \text{если } \sum_{r=1}^R w_{rl}^{ic(3)} b_{ir} x_{rv} = 0, \end{cases}$$

$$b_{iv} = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta_i\text{-я задача использует } \rho_r \text{ процедуру,} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$w_{il}^{c(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й информационный элемент } d_l \\ & \text{считывается (записывается)} \\ & \text{процедурой } \rho_r \text{ задачи } \eta_i, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для решения поставленных задач разработан алгоритм, учитывающий особенности целевых функций и позволяющий существенно сократить в большинстве практических случаев общее число рассматриваемых вариантов синтеза структуры программного и информационного обеспечения СОД реального времени [7, 9–11].

Поставлены также задачи оптимального синтеза модульных СОД реального времени, использующих приоритетные дисциплины организации обслуживания заявок. Реальный масштаб времени работы системы и модульная организация программного и информационного обеспечения накладывают ряд ограничений на постановку и решение задач синтеза СОД реального времени данного класса, основное из которых заключается в необходимости учета динамики реализации программных модулей, обусловленной выбранной дисциплиной приоритетной диспетчеризации, характеристик потоков заявок, потерь от ожидания их обслуживания и взаимосвязей между заявками и задачами обработки данных [7, 11].

Известно, что типизация проектных решений существенно снижает общую трудоемкость разработки, отладки и внедрения АИУС. Существуют три основные стратегии типизации:

- синтез типовых модульных СОД для решения заданного множества задач одного класса;
- комплектация и настройка программ для решения требуемой задачи из ограниченного набора типовых программных модулей;
- синтез рабочих программ на основе имеющихся прототипов (аналогов) СОД с учетом специ-

Задача синтеза структуры модульных СОД реального времени

Режимы обслуживания	Критерии синтеза
Круговое циклическое обслуживание с послепробытием	$E_1(nQ) = nQ \left(\frac{1-\lambda Q}{1-\lambda a} \right) \rightarrow \min \{x_{rv}, z_{lf}\}$
Круговое циклическое обслуживание с допробытием	$E_2(nQ) = \left(\frac{Q\lambda a[a\lambda + n(1-\lambda Q) - 1]}{1-\lambda a} \right) \rightarrow \min \{x_{rv}, z_{lf}\}$
Раньше пришел — раньше обслужен	$E_3(nQ) = \left(\frac{a\lambda(a-Q)}{1-\lambda a} + nQ \right) \rightarrow \min \{x_{rv}, z_{lf}\}$
Частично-круговое обслуживание	$E_4(nQ) = \left(\frac{Q\alpha^m}{1-\alpha} \right) + nQ \left(\frac{1-\alpha^m}{1-\alpha} \right) \rightarrow \min \{x_{rv}, z_{lf}\}$, где $\alpha = \left(\frac{a\lambda - \lambda Q}{1-\lambda Q} \right)$, $\lambda = \sum_{i=1}^I \lambda_i$ — интенсивность суммарного потока заявок $i = \overline{1, I}$, Q — квант времени обслуживания заявок, n — случайное положительное целое число, a — среднее время решения задач в СОД реального времени



фики и содержательного описания конкретной задачи.

Поэтому серьезное внимание уделялось методам синтеза типовых модульных АИУС. Для них разработаны модели и методы анализа технологий решения заданного множества задач обработки данных одного класса. Созданные модели и методы обеспечивают выделение общих (типовых) частей заданного множества задач, его подмножеств, специфических частей каждой задачи и построение интегрированного графа технологии, учитывающего типовые и специфические части. Параметры типовой (общности) его элементов определяются путем последовательной кластеризации задач, которые представлены в интегрированном графе, по критериям близости (подобия) информационных, процедурных и технологических характеристик решаемых в АИУС задач обработки данных. В результате выполнения процедур кластеризации формируются подмножества подграфов интегрированного графа, характеризующиеся и различными уровнями типовой, и набором характеристик, исходных для синтеза типовой модульной АИУС по заданному критерию эффективности с учетом ограничений. При использовании формальных методов и средств анализа и синтеза типовых модульных систем общее время и затраты на разработку сокращаются в несколько раз, при достаточной большой общности в требованиях автоматизируемых объектов [6, 7, 9, 13].

В качестве наиболее типичного примера задач такого класса приведем задачу синтеза типовых модульных СОД в АИУС, в которой в качестве значений оптимизируемого функционала рассматриваются значения показателей приведенной стоимости разработки, отладки и эксплуатации типовой системы модулей и информационных массивов, т. е.

$$\min_{\{p_m b_r\}} \Phi = \min_{\{p_m b_r\}} \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L S_{pm} x_{lm} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L S_{om} x_{lm} + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R S_{pr} x_{rm},$$

где S_{pm} — приведенная стоимость разработки m -го модуля; S_{om} — приведенная стоимость отладки m -го программного модуля; S_{pr} — приведенная стоимость проектирования r -го информационного массива, $x_{lm} = 1$, если l -я процедура входит в состав m -го модуля, $x_{lm} = 0$ в противном случае; $x_{mn} = 1$, если m -й модуль входит в состав программного обеспечения n -го пользователя, $x_{mn} = 0$ в противном случае; $x_{ln} = 1$, если $\sum_{m=1}^M x_{lm} x_{mn} \geq 1$, $x_{ln} = 0$ в противном случае; $x_{jl} = 1$, если j -й элемент обрабаты-

вается l -й процедурой, $x_{jl} = 0$ в противном случае; $x_{jr} = 1$, если j -й информационный элемент входит в состав r -го информационного массива, $x_{jr} = 0$

в противном случае; $x_{jm} = 1$, если $\sum_{l=1}^L x_{jl} x_{lm} \geq 1$, $x_{jm} = 0$

в противном случае; $x_{rm} = 1$, если $\sum_{j=1}^J x_{jr} x_{jm} \geq 1$,

$x_{rm} = 0$ в противном случае.

Ограничения на:

— максимальное и минимальное число процедур в модуле

$$L \leq \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L x_{lm} < \tilde{L}, \quad m = \overline{1, M};$$

— размер записи каждого массива

$$\sum_{j=1}^J x_{jr} \leq Q_1, \quad r = \overline{1, R};$$

— интерфейс между модулями системы обработки данных

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{m'=m+1}^M x_{jm} x_{jm'} \leq A;$$

— число синтезируемых модулей

$$2 \leq \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x_{mn} \leq K;$$

— однократность включения процедур в программные модули

$$\sum_{n=1}^N x_{ln} = 1, \quad l = \overline{1, L};$$

— число информационных элементов, используемых модулями,

$$\sum_{j=1}^J x_{jm} \leq Q_2, \quad m = \overline{1, M},$$

где Q_2 — максимально допустимое число информационных элементов, используемых модулями;

— интерфейс между отдельным модулем m' и другими модулями

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{m'=m+1}^M x_{jm} x_{jm'} \leq A';$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L T_{pm} x_{lm} + \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L T_{om} x_{lm} + \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R T_{pr} x_{jr} \leq T.$$

Удовлетворение базисных требований к АИУС (надежность, информационная безопасность, мас-



штабируемость, многоагентность и др.) невозможно без создания эффективных средств информационного взаимодействия компонентов системы в разнородной сетевой среде. Сегодня уже никто из разработчиков не относится к этим средствам как к второстепенному обслуживающему механизму. Наоборот, пришло четкое осознание, что они представляют собой «системообразующую конструкцию», определяющую архитектуру АИУС, принципы ее функционирования, стиль и средства ее разработки и конечную эффективность.

Несмотря на наличие многих современных сетевых средств и протоколов на базе TCP/IP (TELNET, FTP, SMTP/POP3, HTTP и т. п.), разработчики распределенных систем управления сталкиваются с целым рядом проблем [15, 16]. В большинстве случаев разработчики вынуждены пользоваться широко известными Интернет-службами и протоколами, изначально спроектированными для решения совсем других задач — поддержки массовых коммуникаций (SMTP/POP3), электронной почты (HTTP) и др. Возникающие проблемы в значительной степени связаны с тем, что упомянутые сетевые технологии не обеспечивают достаточной надежности и устойчивости сетевых обменов, а их семантика не вполне адекватна потребностям распределенных систем. Поэтому создание специализированных сетевых технологий, ориентированных на поддержку взаимодействия в распределенных системах управления, представляет собой актуальную задачу.

В аспекте потребностей разработки распределенных систем все наиболее распространенные сетевые протоколы и Интернет-службы не свободны от ряда фундаментальных недостатков. Перечислим основные из них.

- Во всех этих службах (кроме электронной почты) отсутствуют собственные средства межсерверного взаимодействия и межсерверной маршрутизации данных в сети. Другими словами, все они ориентированы на работу в однородной сети, допускающей прямое сетевое соединение между любыми двумя узлами. Вместе с тем, соображения безопасности все чаще заставляют разработчиков «прятать» серверы и рабочие станции системы в частных локальных сетях с отказом от однородности сети. В этих условиях возможность взаимодействия через цепочку серверов (т. е. через узлы-посредники) становится необходимой.
- Отсутствие в службах надежных встроенных средств защиты от несанкционированного доступа существенно осложняет задачу обеспечения информационной безопасности. Имеющиеся, например, в HTTP или POP3 средства защиты примитивны и не могут быть признаны удовлетворительными.

- Все распространенные Интернет-службы весьма требовательны к качеству каналов связи и чувствительны к сетевым сбоям. Многим знакома ситуация, когда вследствие разрыва сетевого соединения результаты длительной работы, например, CGI-приложения или Web-сервиса, оказываются потерянными. Этот недостаток особенно характерен для Интернет-служб, которые обычно относят к классу «on-line», т. е. служб, реализующих все фазы взаимодействия (передача параметров, обработка, получение результатов и т. п.) в течение одного сеанса связи. Риск потери данных объясняется тем, что эти службы, как правило, жестко ассоциируют «контекст» сеанса связи с TCP-соединением. Поэтому разрушение соединения означает потерю «контекста» и, как следствие, результатов обработки.

Именно этими недостатками объясняется то обстоятельство, что многие разработчики крупномасштабных АИУС до сих пор прибегают к электронной почте как к средству организации сетевых взаимодействий, т. е. отказываются от режима on-line, чтобы ослабить зависимость от существующего качества линий связи и однородности (неоднородности) сети.

Понятие «контекста» сеанса связи является основополагающим для разработанной в Институте сетевой службы RFPS (Remote File Packets Service — служба удаленных пакетов наборов данных) и протокола RFPP, на котором базируется эта служба [17, 18]. Главная особенность этой службы состоит в том, что этот контекст ассоциируется не с сетевым соединением, а с новым, явно определяемым понятием — удаленным пакетом наборов данных (далее будем называть его просто «пакетом»). Клиент RFPS сам открывает пакет на RFPS-сервере при необходимости удаленного взаимодействия и закрывает его, когда он больше не нужен. В промежутке между этими событиями он может наполнить пакет данными, вызвать те или иные удаленные обработчиком данные, получить результаты их работы, передать пакет другому клиенту, переместить пакет с одного сервера на другой и продолжить обработку на другом сервере и т. п. Причем все это может быть сделано или за одно TCP-соединение, или за несколько. Сохраняя идентификатор пакета, клиент всегда может восстановить контекст сеанса после случайного (или намеренного) разрыва соединения и продолжить работу.

Главная цель разработки RFPS заключалась в:

- создании простого, интуитивно понятного средства сетевой поддержки распределенных приложений и информационно-управляющих систем;
- обеспечении защиты от потери данных в условиях некачественных каналов связи;



- обеспечении возможности межсерверного взаимодействия и межсерверной маршрутизации данных;
- преодолении «водораздела» между так называемыми «on-line» и «off-line»-взаимодействиями. Фактически, применительно к RFPS термины «on-line» и «off-line» скорее характеризуют стиль «поведения» клиента, а не являются имманентными свойствами протокола.

Протокол RFPP может эффективно применяться при [19]:

- поддержке информационного взаимодействия в распределенных гетерогенных АИУС;
- создании технологической электронной почты с гарантированной доставкой;
- разработке поисковых агентов и их взаимодействие в АИУС для поиска информации в Интернет-пространстве;
- создании защищенных тоннелей с использованием сетей общего пользования (Интернет) для поддержки удаленных взаимодействий между корпоративными частными сетями.

Одним из направлений повышения надежности АИУС стала разработка единой методологии реализации системной отладки как основного этапа формирования качества комплексов программ АИУС, определяющего процедуры системной отладки и базирующегося на применении моделей и методов оптимизации в многоэтапном итеративном процессе формирования комплекса программ заданного качества. Качество комплекса программ оценивается с помощью специально разработанной системы обобщенных показателей, перечень которых определяется технологией отладочных работ. Использование показателей качества в соответствии с последовательностью технологических процедур отладки обеспечивает эффективное применение методов оптимизации планирования и автоматизации отладочных работ [7, 10, 11, 20, 21].

В связи с возросшими требованиями к информационной безопасности АИУС были исследованы проблемы её обеспечения на законодательном и организационном уровнях, проблемы информационной безопасности, методы защиты информации от несанкционированного доступа, обеспечения достоверности и сохранности информации. Цель исследований — разработка новых методов и способов резервирования и защиты информации на различных уровнях ее представления, а также методических рекомендаций в области обеспечения информационной безопасности, включая рекомендации по защите от агрессивных информационных воздействий на различные структуры общества. В рамках данного направления разработаны комплексы формализованных методов и средств обеспечения достоверности и сохранности инфор-

мации при обработке данных в системах организационного управления.

На основе предложенных понятий механизмов контроля и защиты данных, понятия «стандартная схема обработки данных» разработана методика оценки достоверности для различных структур обработки данных и различных законов возникновения и взаимодействия ошибок [22, 23]. Подробно рассмотрен широкий круг вопросов резервирования программных модулей и информационных массивов в АИУС как системного метода повышения сохранности данных. Выделены основные стратегии резервирования и приведены результаты анализа их эффективности по различным критериям, а также методы расчета основных вероятностных, временных и стоимостных характеристик рассмотренных стратегий. Проведен анализ основных разрушающих модулей и массивов факторов и даны рекомендации по применению необходимых методов защиты от их воздействия. Поставлены и решены задачи выбора стратегий резервирования и оптимального числа копий и (или) предысторий (дампов) основного массива. Рассмотрены задачи оптимального резервирования программ и массивов данных в системах обработки данных, работающих в реальном масштабе времени [8, 24—39].

2. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУР БАЗ ДАННЫХ

Разработаны модели и методы синтеза оптимальных логических и физических структур локальных (ЛБД), сетевых (СБД) и распределенных (РБД) баз данных АИУС. В результате решения задач синтеза оптимальных логических ЛБД и СБД определяются: оптимальные характеристики логических структур ЛБД и СБД (состав и структуры логических записей и взаимосвязей, точки входа в структуры и другие характеристики), оптимальные структуры запросов и заданий на корректировки; оптимальные спецификации запросов и заданий на корректировки в архитектуре «клиент — сервер» [40—50].

Результаты, полученные на этапе синтеза оптимальных логических структур ЛБД, СБД и РБД, используются в дальнейшем при синтезе физических структур БД и модульного прикладного программного обеспечения с учётом особенностей реализации SQL-запросов.

В результате решения задач синтеза оптимальных логических структур РБД определяются:

- оптимальные характеристики логической структуры РБД (состав и структуры логических записей и взаимосвязей, структура размещения логических записей по серверам баз данных);



- структура размещения локальных баз метаданных (ЛБМД) репозитория по серверам узлов вычислительной сети (ВС);
- оптимальные структуры реализации запросов и транзакций.

Синтез логической структуры РБД рассматривается как поиск оптимального варианта отображения канонической структуры РБД в логическую, обеспечивающего оптимальное значение заданного критерия эффективности функционирования корпоративных АИУС и удовлетворяющего основным системным, сетевым и структурным ограничениям. При отображении группы данных канонической структуры РБД объединяются в типы логических записей с одновременным распределением их и ЛБМД репозитория системы по узлам ВС.

Основные критерии эффективности синтеза логических структур РБД: минимум общего времени последовательной и параллельной обработки множества запросов пользователей, в том числе при наличии многопроцессорных серверов в отдельных узлах ВС; минимум общего времени последовательного выполнения множества транзакций; минимум стоимости функционирования корпоративной АИУС. Ограничения задач синтеза служат ограничения на число групп данных в составе логических записей, на длину формируемых логических записей, на число синтезируемых логических записей и ЛБМД, размещаемых в узлах ВС.

Задача синтеза оптимальной логической структуры РБД по критерию минимума максимального времени реализации в АИУС запросов и транзакций формулируется следующим образом:

$$\min_{\{x_{it}, y_{ir}, z_{pr}, z_{sr}\}} \max_{u_v \in U} T_{u_v}(x_{it}; y_{ir}),$$

где T_{u_v} — время выполнения «рабочей нагрузки» u_v -го класса пользователей ($u_v \in U$),

$x_{it} = 1$, если i -я группа данных включается в t -ю логическую запись; $x_{it} = 0$ в противном случае; $y_{ir} = 1$, если t -я логическая запись размещается на сервере r -го узла ВС; $y_{ir} = 0$ в противном случае, при ограничениях на:

— число групп в составе логической записи

$$\sum_{i=1}^I x_{it} \leq F_t, \quad \forall t = \overline{1, t_0},$$

где F_t — максимальное число групп в t -й записи;

— однократность включения групп в записи

$$\sum_t x_{it} = 1, \quad \forall i = \overline{1, I};$$

— длину формируемой логической записи

$$\sum_{i=1}^I x_{it} y_{ir} \rho_i \Psi_0 \leq \theta_{ir},$$

где θ_{ir} — максимально допустимая длина t -го типа записи, определяемая техническими характеристиками сервера r -го узла ВС и др.

3. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Важное направление исследований состоит в создании методов и моделей планирования и управления комплексами мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС). Существующая тенденция к увеличению масштабов ЧС и тяжести их последствий обуславливает необходимость своевременной обоснованной выработки контрмер по их ликвидации в рамках создаваемых с этой целью соответствующих управленческих структур — систем управления в условиях ЧС. Масштабы ущерба от природных и техногенных ЧС сопоставимы с последствиями военного нападения. Почему же затраты, направленные на уменьшение ущерба от ЧС, существенно меньше затрат на оборону? Тем более, что первые происходят рано или поздно, а вторых можно избежать, проявив гибкость и дальновидность. В нашем сознании должна укорениться мысль, что значительное число ЧС неизбежно: их возникновение — вопрос времени.

Основные особенности функционирования систем управления в условиях ЧС состоят в том, что ЧС ставит перед системой управления задачи, не соответствующие стационарному режиму работы организации и ее прошлому опыту.

Анализ функционирования систем управления в условиях ЧС позволил выделить ряд их особенностей по сравнению с функционированием традиционных систем управления. Система управления в условиях ЧС должна функционировать в следующих четырех режимах: режим повседневной деятельности (стационарный функционирование); режим повышенной готовности (активная подготовка и осуществление превентивных мероприятий); чрезвычайный режим (действия в чрезвычайной ситуации); постчрезвычайный режим (ликвидация долговременных последствий ЧС).

В условиях сложной внешней среды к структуре системы управления в ЧС прежде всего должны быть предъявлены требования гибкости и адаптивности.

В соответствии с многоцелевым назначением структур систем управления в ЧС были предложены понятия дуальных (двойных) либо полиструктур (множественных структур), в которых работа



по ликвидации ЧС проводится в рамках управления множеством стратегических ситуационных зон различного типа, а управление существующими объектами в условиях ЧС выполняется в рамках традиционных структур, которые, естественно, должны быть видоизменены в соответствии с изменившейся ситуацией. Частный случай такого видоизменения — межранговое управление.

Показано, что стратегическое планирование и управление ликвидацией последствий ЧС необходимо осуществлять на основе целевого и сценарного подходов. При разработке сценариев развития ЧС, стратегических, тактических и оперативных планов повышения безопасности и организации противодействия ЧС учитываются особенности функционирования новых экономических механизмов рынка.

Формализовано понятие сценария развития чрезвычайных ситуаций (ЧС) и исследованы методы его использования для моделирования процессов развития ЧС и ликвидации их последствий, включая формирование базовых (наиболее вероятных) сценариев развития ЧС на объектовом и региональном уровнях, а также выделение их очаговых структур.

Сложность и новизна возникающих принципиально новых задач создают возрастающую нагрузку на высшее звено системы управления ЧС, а быстрый темп их появления повышает вероятность стратегических неожиданностей. Эти задачи обладают содержательными характеристиками задач перспективного планирования, однако должны решаться в оперативном режиме. Такая ситуация приводит к необходимости применения средств стратегического управления, с помощью которых существующие системы управления могут противостоять нестабильности, резко меняющимся условиям, сбоям и ошибкам в работе.

Отметим также, что помимо обычных типов резервов (временных и ресурсных) при решении задач моделирования процессов принятия решений в условиях ЧС следует использовать и другие типы резервов, а именно, структурно-технологический, природно-климатический и эколого-физиологический. Наличие структурно-технологического резерва позволяет эффективно управлять имеющимися в наличии силами и средствами при потере работоспособности ряда элементов системы [51].

Для оперативного управления в условиях ЧС предложено использовать новый класс систем — информационно-управляющие системы быстрого развертывания. Основное назначение систем этого класса заключается в обеспечении информированности руководителей работ по ликвидации последствий ЧС. Требуемая степень информированности должна достигаться путем создания в кратчайшие сроки (12–72 ч) АИУС различного

класса и назначения (информационных, информационно-поисковых, информационно-управляющих), функционирующих на базе современных ПЭВМ, а также современных средств связи. При этом обработка поступающей в условиях ЧС в систему управления информации ведется по четырем основным направлениям. В рамках первого направления постоянно ведется обработка текущей информации, второе направление является проблемно-функциональным; третье — территориальным, четвертое — обобщающим, в рамках которого интегрируется не только поступающая информация, но и результаты ее аналитического анализа по проблемно-функциональным и территориальным аспектам в целях ее обобщения и принятия стратегических решений [52].

Разработаны методология, аппарат и прикладные методы создания систем и средств организационного управления комплексами мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий ЧС, возникающих на объектовом и региональном уровнях. Применение разработанных методов и моделей, алгоритмов и программ позволяет повысить оперативность процессов моделирования возможных сценариев развития ЧС, сконцентрировать ресурсы на наиболее опасных направлениях, повысить качество превентивных и оперативных планов противодействия ЧС, что, в свою очередь, существенно снижает общие конечные потери и ущерб от их возникновения и развития [51–53].

4. СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На базе результатов исследований моделей и методов управления в условиях ЧС зародилось и успешно развивается новое научное направление, связанное с разработкой математических моделей и механизмов управления и функционирования сложных социально-экономических систем (СЭС) на основе сценарного подхода [39, 53–56].

Анализ проблем эффективного управления показал, что имеется явный разрыв в формализованном описании этапов целеполагания и формирования конкретных планов работ. В качестве недостающего необходимого промежуточного звена было предложено формировать сценарии поведения объекта, отражающие наиболее характерные черты его функционирования при изменении внешней среды.

Понятие «сценарий» в теории управления сравнительно новое, хотя сегодня оно распространено достаточно широко (особенно при анализе стратегических управленческих решений в социально-политической сфере). Причем его употребление далеко не всегда конструктивно в силу нечет-





кости понимания и определения его роли для решения задач стратегического управления.

Анализ показывает, что построение сценариев направлено на решение двух основных проблем:

- выделение ключевых моментов развития исследуемого объекта и разработка на этой основе качественно различных вариантов его динамики;
- всесторонний анализ и оценка каждого из полученных вариантов, изучение его структурных особенностей и возможных последствий его реализации.

Таким образом, сценарий поведения объекта определяется как *последовательность состояний и предполагаемых условий функционирования системы моделей, описывающих процесс изменения его параметров*. Такие последовательности дискретно фиксируют принципиальные с точки зрения исследователя моменты перехода системы в новое качественное состояние.

Как самостоятельное направление исследований сценарный подход имеет собственную проблематику, методологию и инструментарий. Были выделены основные проблемы, подлежащие решению:

- построение формальной модели СЭС;
- формирование сценария;
- определение характеристик сценария;
- анализ сценария;
- оптимизация сценария;
- преобразование выбранного сценария в программы и планы.

Основные методы построения сценариев могут быть классифицированы следующим образом.

К *неформализованным* относятся методы построения сценариев с приоритетным учетом мнений экспертов.

К *формализованным* относятся методы генерации сценариев, основанные на автоматической или автоматизированной процедуре. Примером служит генерация сценариев на основе когнитивных карт и с использованием формальных грамматик.

К *частично-формализованным* относятся схемы формализованного построения, корректируемые с помощью экспертных оценок.

Анализ существующих средств моделирования развития и функционирования социально-экономических систем показывает, что для генерации сценариев их поведения целесообразно применять аппарат знаковых графов, который позволяет работать как с качественными, так и количественными типами данных. Аппарат знаковых графов позволяет формально строить синергетические сценарии или гипотетические траектории движения моделируемой системы в фазовом пространстве ее переменных (факторов) на основе информации о ее структуре и желательных направлениях ее развития. Предложенная методика заключается в ап-

проксимации тенденций развития СЭС фрагментами траектории импульсных процессов на знаковых орграфах. При этом определяются основные тенденции развития СЭС без вмешательства извне или при задаваемых управляющих воздействиях (прямая задача) [55].

При отрицательной качественной оценке характеристик наблюдаемых параметров следует перейти к решению обратной задачи — поиску эффективных с точки зрения ЛПР управлений и их использованию в модели, т. е. перейти к генерации аттрактивных сценариев специального типа.

Математическая модель знаковых, взвешенных знаковых, функциональных знаковых орграфов является расширением математической модели орграфов. Кроме орграфа $G(X, E)$, в модель включаются следующие компоненты:

— множество параметров вершин $V = (v_i, i \leq N = \|X\|)$. Каждой вершине x_i ставится в соответствие ее параметр $v_i \in V$;

— функционал преобразования дуг $F(V, E)$, ставящий в соответствие каждой дуге либо знак, либо вес, либо функцию.

Если функционал имеет вид

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +1, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ влечет} \\ & \text{за собой рост (падение) } v_j, \\ -1, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ влечет} \\ & \text{за собой рост (падение) } v_j, \end{cases}$$

то такая модель называется знаковым орграфом.

Если функционал имеет вид

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +w_{ij}, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ влечет} \\ & \text{за собой рост (падение) } v_j, \\ -w_{ij}, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ влечет} \\ & \text{за собой рост (падение) } v_j, \end{cases}$$

то такая модель называется взвешенным знаковым орграфом; w_{ij} — вес соответствующей дуги.

Если функционал имеет вид

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = f_{ij}(v_i, v_j),$$

то такая модель называется функциональным знаковым орграфом.

На расширенных таким образом орграфах вводится понятие импульса и импульсного процесса в дискретном временном пространстве.

Импульсом $P_i(n)$ в вершине x_i в момент времени $n \in N$ называется изменение параметра в этой вершине в момент времени n :

$$P_i(n) = v_i(n) - v_i(n-1). \quad (1)$$



При этом значение параметра в вершине x_i определяется соотношением

$$v_i(n) = v_i(n-1) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F(v_i, v_j, e_{ij}) P_j(n-1) + P_i^0(n), \quad (2)$$

где $P_i^0(n)$ — внешний импульс, вносимый в вершину e_i в момент времени n . Из конечно-разностных уравнений (1) и (2) легко получить уравнение для импульса в исследуемом процессе:

$$P_i(n) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F(v_i, v_j, e_{ij}) P_j(n-1) + P_i^0(n).$$

Предложенная методология сценарного проектирования и опыт ее применения показывают принципиальную возможность формализованного сценарного анализа и осуществления в дальнейшем синтеза эффективных сценариев развития сложных систем в различных предметных областях. Разработанный сценарный подход позволяет описывать процессы развития СЭС на различных уровнях детализации, учитывать динамику и дискретный характер изменений различных ее элементов, формализовать ресурсные, технологические, логические и другие ограничения и решать на единой методологической основе широкий спектр задач стратегического управления. Таким образом сценарий служит необходимым промежуточным звеном между этапами целеполагания и формирования конкретных планов работ, который целесообразно применять в качестве основного инструмента для разработки моделей и методов выбора эффективных стратегических и оперативных решений по планированию и управлению функционированием СЭС [39, 51, 56, 57].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили в конце 1990-х гг. разработать основные положения и ряд программных комплексов промышленной технологии автоматизированного проектирования АИУС. Методология и соответствующие программные средства ориентированы на комплексное решение задач автоматизации этапов разработки, внедрения, сопровождения и модификации проектов систем управления на базе новейших достижений в области создания микропроцессорной техники, локальных и распределенных сетей ЭВМ, максимального использования принципов модульности, типизации и клонирования [43, 46, 48, 50].

Промышленная технология автоматизированного проектирования (ПТАП) АИУС реализуется с помощью САПР «Модуль», АРИУС, а также методов и систем компьютерной графики, которые обеспечивают:

- минимизацию общей трудоёмкости и длительности разработки информационного и программного обеспечения АИУС;
- высокое качество и надёжность разработанных комплексов программ и их информационного обеспечения;
- унификацию технологии разработки информационного и программного обеспечения АИУС различного назначения;
- эффективное использование ресурсов памяти и производительности ЭВМ;
- возможность совместных действий разработчиков и пользователей в процессе проектирования АИУС.

Адаптируемость структуры и средств ПТАП к непрерывно меняющимся условиям функционирования АИУС обеспечивается в САПР «Модуль» путем их настройки на конкретную предметную область, осуществляемой посредством генерации, конфигурирования и параметризации её компонентов. В последнее время в рамках ПТАП разработаны научно-теоретические основы создания АИУС на основе многомерных постреляционных СУБД и инструментальных средств четвертого поколения в соответствии со стандартами «открытых систем», что позволяет обеспечить АИУС высокую мобильность, аппаратную независимость и эффективную обработку данных различных типов в многопользовательском распределенном режиме.

Полученные теоретические результаты использовались при разработке и внедрении ряда АСУ, имеющих важное народно-хозяйственное значение: «Металл», «Метро», «Морфлот», «Обмен», Автоматизированная информационная система почтовой связи России, АС национального центрального бюро Интерпола при МВД РФ (ИВС Интерпола), ряда информационных подсистем АИУС Министерства внутренних дел РФ.

В последнее время полученные ранее результаты были адаптированы применительно к АИУС реального времени специального назначения. Разработаны модели и методы анализа, синтеза и отладки оптимальных информационно-управляющих систем специального класса объектов — долговременных орбитальных станций. В результате исследования орбитальной станции как специального объекта управления разработаны модели, методы и инструментальные средства создания модульного программного и информационного обеспечения АИУС реального времени для космических систем [10, 11, 58].





ЛИТЕРАТУРА

1. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Цвиркун А.Д. Проблемы автоматизации проектирования АСУ (обзор) // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 5. — С. 168—189.
2. Синтез оптимальных функциональных модулей обработки данных в АСУ / А.Г. Мамиконов, А.А. Ашимов, В.В. Кульба и др. — М.: ИПУ РАН, 1979.
3. Кульба В.В., Мамиконов А.Г. Методы анализа и синтеза оптимальных модульных систем обработки данных // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 11. — С.152—179.
4. Ашимов А.А., Мамиконов А.Г., Кульба В.В. Оптимальные модульные системы обработки данных. — Алма-Ата: Наука, 1981. — 186 с.
5. Мамиконов А.Г., Кульба В.В. Синтез оптимальных модульных СОД. — М.: Наука, 1986. — 276 с.
6. Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Косяченко С.А. Типизация разработки модульных систем обработки данных. — М.: Наука, 1989.
7. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / Д.А. Кононов, В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. — 800 с.
8. Мамиконов А.Г., Цвиркун А.Д., Кульба В.В. Автоматизация проектирования АСУ. — М.: Энергоиздат, 1981. — 328 с.
9. Оптимальные модульные системы реального времени (анализ и синтез) / Кульба В.В., Н.А. Кузнецов, С.А. Косяченко и др. — М.: ИППИ РАН, 1994.
10. Кульба В.В., Микрин Е.А., Павлов Б.В. Проектирование информационно-управляющих систем долговременных орбитальных станций. — М.: Наука, 2002. — 579 с.
11. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В.В. Кульба, Е.А. Микрин, Б.В. Павлов, В.Н. Платонов. — М.: Наука, 2006. — 579 с.
12. Предпроектный анализ структуры информационных потоков и технологии обработки данных при разработке модульных СОД / А.Г. Мамиконов А.Г., В.В. Кульба, А.С. Миронов, А.В. Товмасын. — М.: ИПУ РАН, 1980. — 43 с.
13. Анализ технологий обработки данных при разработке типовых АСУ / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, С.А. Косяченко, Е.Н. Сидоров. — М.: ИПУ РАН, 1986.
14. Постановка задачи оптимизации программного обеспечения автоматизированных систем управления реального времени / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, С.А. Косяченко и др. — М.: ИПУ РАН, 1985.
15. Асратян Р.Э., Лебедев В.Н., Дмитриев Р.И. Интернет и распределенные многоагентные системы. — М.: Ленанд, 2007. — 72 с.
16. Lebedev V.N., Asratyan R.E., and Orlov V.L. Distributed multi-agent systems for vertically integrated companies: architecture and interfaces. INCOM 2006. Saint-Etienne, France, 2006. — P. 99—104.
17. Асратян Р.Э. Интернет-служба для поддержки распределенных информационно-управляющих систем // Проблемы управления. — 2005. — № 6. — С. 73—77.
18. Асратян Р.Э. Интернет-служба для поддержки межсерверных взаимодействий в распределенных информационных системах // Там же. — 2006. — № 5. — С. 58—62.
19. Асратян Р.Э., Лебедев В.Н. Средства информационного взаимодействия в современных распределенных гетерогенных системах. — М.: Ленанд, 2008. — 120 с.
20. Отладка и опытная эксплуатация комплексов программ АСУ / А.Г. Мамиконов, С.А. Косяченко, В.В. Кульба, А.Д. Цвиркун — М.: ИПУ РАН, 1979.
21. Модели, методы и средства анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / В.В. Кульба, Г.З. Казиев, Н.А. Кузнецов, А.Б. Шелков // Автоматика и телемеханика. — 1993. — № 6.
22. Кульба В.В., Пелихов В.П. Задачи анализа и синтеза систем защиты и контроля при обработке данных в АСУ. — М.: ИПУ РАН, 1980.
23. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Пелихов В.П. Определение вероятностных характеристик метода контроля с обратной связью для марковского и полумарковского процессов возникновения ошибок // Автоматика и телемеханика. — 1980. — № 10.
24. Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Сомов С.К. Анализ стратегий резервирования программных модулей и информационных массивов в сетях ЭВМ // Автоматика и телемеханика. — 1984. — № 2.
25. Методы повышения достоверности и сохранности информации в АСУ (обзор) / В.В. Кульба, А.Б. Шелков, А.Г. Мамиконов, В.П. Пелихов // Там же. — 1985. — № 2.
26. Выбор методов повышения сохранности информации на магнитных носителях / В.В. Кульба, В.В. Липаев, А.Г. Мамиконов, А.Б. Шелков // Там же. — 1985. — № 1.
27. Кульба В.В., Мамиконов А.Г., Лутковский Ю.П. Анализ предметной области банков данных и построение оптимальных структур баз данных с учетом требований к достоверности информации. — М.: ИПУ РАН, 1985.
28. Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Шелков А.Б. Достоверность, защита и резервирование информации в АСУ. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
29. Обобщенная модель резервирования программных модулей и информационных массивов в АСУ / В.В. Кульба, А.Б. Шелков, А.Г. Мамиконов, Б.Ю. Наткович // Автоматика и телемеханика. — 1986. — № 9.
30. Использование сетей Петри при проектировании систем обработки данных / А.Г. Мамиконов, Я. Деметрович, В.В. Кульба и др. — М.: Наука, 1986.
31. Использование сетей Петри с разноцветными маркерами для анализа эффективности механизмов защиты данных в базах данных / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, Ш.Б. Китапбаев, А.Р. Швецов. — М.: ИПУ РАН, 1988. — 50 с.
32. Кульба В.В., Сомов С.К., Шелков А.Б. Резервирование данных в сетях ЭВМ. — Казань: Изд-во КГУ, 1987.
33. Восстановление информации в системах обработки данных / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, Б.Ю. Наткович, А.Б. Шелков. — М.: ИПУ РАН, 1988.
34. Резервирование баз данных в АСУ / В.В. Кульба, А.Г. Мамиконов, Б.Ю. Наткович, А.Б. Шелков // Автоматика и телемеханика. — 1991. — № 1.
35. Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Швецов А.Р. Модифицированные сети Петри. — М.: ИПУ РАН, 1991.
36. Кульба В.В., Урбански Ф., Шелков А.Б. Структурно-технологическое резервирование и особенности его использования в ЛВС // Research report. — 1993. — № 5.
37. Методы повышения эффективности и качества функционирования автоматизированных информационно-управляющих систем / В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, Т.В. Карсанидзе и др. / Под ред. И.В. Прангишвили. — М.: Компьютер, 2001. — 344 с.
38. Кульба В.В., Ковалевский С.С., Шелков А.Б. Достоверность и сохранность информации в АСУ. — М.: СИНТЕГ, 2003.
39. Информационная безопасность систем организационного управления. Теоретические основы: в 2 т. / Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба, Е.А. Микрин и др. — М.: Наука, 2006. — Т. 1 — 495 с.; — Т. 2. — 457 с.
40. Оптимизация структур данных в АСУ / А.Г. Мамиконов, А.А. Ашимов, В.В. Кульба и др. — М.: Наука, 1988. — 256 с.



41. *Модели* и методы проектирования распределенных баз данных (обзор) / С.А. Косяченко, В.В. Кульба, А.Г. Мамиконов, Н.А. Ужастов // Автоматика и телемеханика. — 1989. — № 3. — С. 3—58.
42. *Задачи* синтеза оптимальных модульных диалоговых систем / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, С.А. Косяченко и др. — М.: ИПУ РАН, 1989. — 42 с.
43. *Промышленная* технология автоматизированного проектирования информационного и программного обеспечения САПР и АСУ на базе типовых модульных систем обработки данных / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, С.А. Косяченко, А.Б. Шелков // Вычислительная техника. Системы. Управление. — М., 1989. — Вып. 1.
44. *Методы* типизации при анализе предметных областей пользователей РБД / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, С.А. Косяченко и др. — М.: ИПУ РАН, 1990.
45. *Оптимизация* структур распределенных баз данных в АСУ / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, С.А. Косяченко, Н.А. Ужастов. — М.: Наука, 1990. — 240 с.
46. *Система* автоматизированного проектирования информационно-управляющих систем «Модуль-2» / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, З.В. Карибская и др. — М.: ИПУ РАН, 1991.
47. *Кульба В.В., Сиротюк В.О., Ковалевский С.С.* Синтез оптимальных логических структур и базы данных репозитория распределенных баз данных // Компьютер. — 1998. — № 2. — С. 62—67.
48. *Промышленная* технология и CASE-средства автоматизированного проектирования баз данных / В.В. Кульба, В.О. Сиротюк, С.А. Косяченко и др. — М.: ИПУ РАН, 1999. — 120 с.
49. *Сиротюк В.О.* Модели и методы синтеза оптимальных логических структур и базы метаданных репозитариев распределенных баз данных в АСУ // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 3. — С. 166—179.
50. *Теоретические* основы проектирования оптимальных структур распределенных баз данных / В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко, В.О. Сиротюк. — М.: СИНТЕГ, 1999. — 669 с.
51. *Архипова Н.И., Кульба В.В.* Управление в чрезвычайных ситуациях. — М.: РГГУ, 2008. — 474 с.
52. *Модели*, методы и автоматизация управления в условиях чрезвычайных ситуаций (обзор) / Кузнецов Н.А., Кульба В.В., Косяченко С.А., Шелков А.Б. // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 6. — С. 3—66.
53. *Управление* риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / Г.Г. Малинецкий, В.В. Кульба, Н.А. Махутов и др.; под ред. И.М. Макарова. — М.: Наука, 2000. — 431 с.
54. *Формирование* сценарных пространств и анализ динамики поведения социально-экономических систем / Д.А. Кононов, В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко. — М.: ИПУ РАН, 1999.
55. *Методы* формирования сценариев развития социально-экономических систем / В.В. Кульба, Д.А. Кононов, С.А. Косяченко, А.Н. Шубин. — М.: СИНТЕГ, 2004. — 296 с.
56. *Управление* и контроль реализации социально-экономических целевых программ / Под ред. В.В. Кульбы и С.С. Ковалевского. — М.: Кн. дом «Либроком», 2009. — 400 с.
57. *Организационное* управление / Н.И. Архипова, В.В. Кульба, С.А. Косяченко и др. — М.: РГГУ, 2007. — 733 с.
58. *Ковалевский С.С., Микрин Е.А., Пелихов В.П.* Модели и методы анализа и предупреждения возникновения нештатных ситуаций при управлении функционированием долгосрочных орбитальных станций. — М.: ИПУ РАН, 2000.



Кульба Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, зав. лабораторией модульных информационно-управляющих систем ИПУ. Председатель секции «Автоматизированные системы организационного управления и обработки данных» Ученого совета ИПУ, член редколлегии журнала «Проблемы управления». Известный специалист в области информатики и проектирования автоматизированных информационно-управляющих систем. Автор более 450-ти научных трудов, в том числе более 50-ти монографий. Лауреат Премии им. акад. Б.Н. Петрова Президиума РАН. ☎(495) 334-90-09, ✉ kulba@ipu.ru.



Косяченко Станислав Анатольевич — д-р техн. наук, главный научный сотрудник ИПУ. Известный специалист в области информатики и проектирования автоматизированных информационно-управляющих систем. Автор более 200 научных трудов, из них более 25-ти монографий. ☎(495) 334-89-59, ✉ urlgad@ipu.ru.



Лебедев Виталий Николаевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией распределенных автоматизированных информационных систем ИПУ, доцент МФТИ. Более 30 лет занимается разработкой методов и средств создания распределенных автоматизированных информационно-управляющих систем в гетерогенной сетевой и аппаратно-программной среде. Автор более 70-ти научных работ, в том числе 3-х монографий. ☎(495) 334-92-81, ✉ lebvini@ipu.rssi.ru.

УДК 531.3:681.5.01

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В.Ю. Рутковский

Приведены основные результаты по созданию теории и систем управления объектами космической и авиационной техники, полученные в Институте проблем управления РАН.

Ключевые слова: система управления, жидкостный ракетный двигатель, искусственный спутник Земли, ракета, деформируемые космические аппараты, самолет, обработка изображений.

ВВЕДЕНИЕ

В Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН традиционно выполняются работы по развитию теории управления движущимися объектами. Эти работы были поставлены и до 1980 г. проводились под руководством академика Б.Н. Петрова. К такому классу объектов относятся ракеты, искусственные спутники Земли и другие типы космических аппаратов, самолеты и ракетные двигатели.

В статье приводятся основные результаты по теории и разработке систем опорожнения баков в жидкостных ракетных двигателях и системы синхронизации расходования топлива, по теории бортовых терминальных систем. Отмечена разработка общей концепции совершенствования энергетических характеристик ракет-носителей средствами управления. Отмечено также, что теоретические результаты были реализованы и созданные на их основе системы управления стали составной частью всех крупных жидкостных ракет разработки Главных конструкторов С.П. Королева, М.К. Янгеля, В.Н. Челомея, В.Ф. Уткина.

Приведены результаты по разработке структуры и теории системы предварительного успокоения гравитационно стабилизируемых спутников Земли, по созданию систем ориентации деформируемых космических аппаратов, по решению задачи совместного оценивания координат движения основного тела объекта и конечного числа изгибных мод.

Изложены основные результаты по разработке теории адаптивных систем с моделью и адаптив-

ных систем управления одним классом ракет. Отмечены работы по теории координатно-параметрического управления, управления космическими свободно летающими роботизированными модулями и большими космическими конструкциями.

Приведены работы в области построения узлов управляющих вычислительных машин из элементарных цифровых интеграторов, архитектур и методов повышения отказоустойчивости бортовых вычислительных комплексов.

Изложены вопросы разработки принципов построения, структур и методов реализации бортовых информационно-управляющих систем высочайших автономных космических аппаратов. Отмечены результаты по новой ветви теории управления — стохастической H_∞ -теории робастного управления, по исследованиям в области создания интеллектуальных информационно-управляющих систем для сложных технических объектов и человеко-машинных комплексов.

Приведены основные результаты по энергетическому подходу к управлению движением, по информационному обеспечению для обработки трехмерных изображений поверхности Земли.

1. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТНЫМИ РАКЕТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

В Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова (ИПУ) работы по созданию теории управления летательными аппаратами были начаты в начале 1950-х гг.

В конце 1940-х — начале 1950-х гг. в СССР под руководством С.П. Королева были начаты работы по созданию первой межконтинентальной ракеты



Р-7. Были поставлены две новые, ранее никем не решавшиеся задачи: управление кажущейся скоростью ракеты и управление расходом топлива с целью синхронизации опорожнения баков окислителя и горючего и обеспечения минимального гарантированного запаса топлива в баках в момент отключения двигателя. Решение этих задач потребовало создания теории и систем управления жидкостными ракетными двигателями (ЖРД). В связи с этим по просьбе С.П. Королева и В.П. Глушко в ИПУ были начаты работы по управлению ЖРД. Руководил работами Б.Н. Петров (1913—1980), тогда молодой ученый, а впоследствии академик, вице-президент АН СССР, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР, кавалер пяти орденов Ленина и многих других орденов и медалей Советского Союза и ряда зарубежных стран.

Исследования ЖРД начались с его анализа как объекта управления. Были определены динамические свойства ЖРД, места приложения управляющих воздействий, взаимосвязь отдельных координат, требования к датчикам и исполнительным механизмам системы управления. В 1953 г. был выпущен семитомный проект, в котором содержались самые первые результаты по решению задачи управления расходом топлива, проектированию системы опорожнения баков, системы регулирования кажущейся скорости, рассматривались возможные типы исполнительных механизмов в системах управления ракетой. Исполнителями проекта были Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, В.В. Петров, Г.М. Уланов, С.В. Емельянов, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова и др. [1, 2].

Проект обсуждался на заседании Комиссии Президиума АН СССР. Работа получила высокую оценку председателя Комиссии академика М.В. Келдыша, академика Б.С. Стечкина и первого заместителя С.П. Королева академика В.П. Мишина.

Постановлением правительства в 1954 г. Институту было поручено возглавить исследования в части управления двигательной установкой ракеты Р-7.

Проблема построения системы управления тягой ЖРД, систем регулирования соотношения компонентов топлива и синхронизации опорожнения баков ракеты была весьма актуальной задачей, ее решение сопровождалось немалыми трудностями, которые всегда сопутствуют созданию принципиально новых систем — «с нуля», без какой-либо предыстории, при полном отсутствии прототипов систем и серьезных литературных источников.

Работы Института, посвященные методологии вывода математической модели ЖРД, изучению особенностей динамики двигателя, исследованию

принципов построения систем управления ЖРД, имели очень важное значение и составили один из разделов общей теории ЖРД. В этот раздел вошло большое число новых теоретических задач, с которыми столкнулись разработчики ракеты Р-7 и многих последующих ракет. В частности, методика моделирования динамики ЖРД на аналоговых ЭВМ позволила существенно ускорить формирование способа решения задачи продольной неустойчивости ракеты Р-7 (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, В.Н. Марков, А.И. Чацкий), позволила определить причину взрывов некоторых ракет при испытательных пусках и найти средства их предотвращения (Б.Н. Петров).

При создании системы опорожнения баков возникла проблема создания высокоточных беспоплавковых бортовых измерителей уровня жидкости в баках. В ИПУ был создан эндовибраторный датчик (Л.Г. Палевич, В.А. Викторов) и проведены поисковые работы по изучению прототипа емкостной чувствительной точки. Выполнены первые работы по поиску рациональных характеристик управляющих органов — дросселей системы опорожнения баков и регулирования соотношения компонентов топлива в магистралях ЖРД.

В связи с разработкой систем регулирования опорожнения баков и синхронизации расхода топлива в ИПУ были начаты работы по созданию теории бортовых терминальных систем управления (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов и др.). В настоящее время эта теория находит широкое применение при проектировании систем управления баллистическими ракетами, позволяя решать такие задачи, как статистический синтез алгоритмов терминального управления, фильтрации, прогнозирования и предельных точностных характеристик терминальных систем управления, оптимизации временной последовательности интервалов квантования импульсных систем терминального управления и многие другие.

Работы по созданию систем опорожнения баков и синхронизации расхода топлива в баках ракеты в 1967 г. были отмечены Государственной премией СССР. От ИПУ Государственную премию получил Ю.П. Портнов-Соколов.

В 1980-е гг. в ИПУ была завершена разработка общей концепции совершенствования энергетических характеристик ракет-носителей средствами управления (Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов), реализация которой позволила повысить грузоподъемность ракет на 10—15 %. Большое семейство систем управления расходом топлива впоследствии было внедрено в разработках ракетно-космической техники при создании ракет-носителей «Энергия», «Зенит 2S», Зенит



3SL» (для международной программы «Морской старт») и «Протон-М» (при участии А.С. Поддубного, В.А. Жукова, В.К. Завадского и др.). Данный цикл работ отмечен в 1983 г. Государственной премией СССР. От ИПУ премию получили Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, А.С. Поддубный, В.П. Иванов.

На рубеже столетий был выполнен цикл работ по обеспечению безопасности ракетно-космической техники средствами управления. Общепринятая концепция приемлемого риска была доработана с учетом чрезвычайно высокой энергетической и информационной напряженности (А.Я. Андриенко, В.П. Иванов). Результаты этих работ реализованы в разработках ракетно-космической техники (с участием В.А. Жукова, В.К. Завадского и др.). При проектной разработке семейства ракет-носителей «Ангара» реализованы новые технологии построения пневмогидравлических систем подачи топлива с использованием новых датчиков давления и алгоритмических средств диагностики и парирования отказов в каналах измерения и исполнительных органах. В состав модернизированного варианта ракеты-носителя «Протон» введена система управления выработкой топлива и исключением двигателей ступеней, позволяющая снизить уровень экологически вредных остатков топлива.

В последние годы более востребованными оказались работы, связанные с заменой устаревшего парка ракет-носителей и космических аппаратов. В этой связи следует отметить участие ИПУ в выполнении программы введения в эксплуатацию вместо ракет-носителей «Спутник», «Восток», «Молния», «Союз-V» и «Союз-ФГ» новой ракеты-носителя «Союз-2» [3, 4], обеспечившей успешное выведение на орбиту космических аппаратов «Метон», «Меридиан» и «Коро».

Указанные выше результаты носят основополагающий характер, созданные на их основе системы управления стали составной частью всех крупных жидкостных ракет разработки главных конструкторов С.П. Королева, М.К. Янгеля, В.Н. Челомея и В.Ф. Уткина. Работы Института были отмечены высокими правительственными и государственными наградами. Сотрудники лаборатории, возглавляемой Ю.П. Портновым-Соколовым, в целом получили 26 орденов и медалей Советского Союза.

Заведующий отделом ИПУ, академик-секретарь Отделения механики и процессов управления, председатель Совета по международному сотрудничеству в области исследования и использования космического пространства «Интеркосмос» Б.Н. Петров принимал активное участие в создании и изготовлении многоместных пилотируемых кораблей-спутников «Восход 1» и «Восход 2»,

проведении их запусков и осуществлении мягкой посадки космических аппаратов на поверхность Луны, в передаче на землю фотографий лунной панорамы и выводе на орбиту первого в мире искусственного спутника Луны. В составе группы ученых из ряда промышленных организаций в 1966 г. за эти работы он был удостоен Ленинской премии.

2. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

С конца 1950-х гг. в ИПУ развивается теория управления искусственными спутниками Земли (ИСЗ). По инициативе Д.Е. Охоцимского в эти годы в нашей стране начали создаваться гравитационные системы ориентации ИСЗ. Это пассивные системы, не требующие расхода энергии на ориентацию и стабилизацию углового положения спутника. Однако управляющие моменты такой системы очень малы и не способны парировать возмущения по углам и их скоростям, которые возникают при отделении спутника от ракеты-носителя. В результате понадобилась разработка активной системы предварительного успокоения спутника.

В ИПУ под руководством Б.Н. Петрова были разработаны структура и теория оригинальной релейной системы предварительного успокоения спутника [1] (В.Ю. Рутковский, В.И. Попов, В.С. Косиков, Б.В. Павлов). Высокая экономичность такой системы достигалась благодаря введению специальной связи, компенсирующей петлю гистерезиса релейной характеристики, и выбору соответствующего соотношения между ограничениями выходных величин датчиков положения и угловой скорости спутника. В 1970 г. группа ученых Института прикладной математики РАН, ИПУ РАН, НПО прикладной механики и ЦНИИ автоматики и гидравлики за разработку пассивных систем ориентации ИСЗ была удостоена Государственной премии СССР. От ИПУ премию получили В.Ю. Рутковский и В.И. Попов.

В 1990-е гг. в ИПУ (А.Я. Андриенко, А.И. Чадаев) была предложена усиленно-гравитационная система орбитальной угловой стабилизации космических аппаратов на основе использования нитяной (кевларовой или, в перспективе, нанотехнологической нити длиной более 1 км) связки основного тела с дополнительным, что значительно увеличивает управляющий гравитационный момент аппарата [5].

Дальнейшее развитие теории управления ИСЗ в ИПУ было связано с созданием систем ориентации деформируемыми космическими аппаратами (ДКА) [1]. К ним относятся ИСЗ с присоединен-



ными гибкими элементами (большие панели солнечных батарей, выносные антенны и др.). Нежесткость конструкции ДКА порождает новые проблемы, связанные с обеспечением устойчивости движения и точности ориентации таких объектов, с увеличением расхода энергии на управление, с надежностью системы и др.

В связи с этим был предложен новый метод описания динамики ДКА — модально-физическая форма математической модели, метод фазовой биплоскости для синтеза алгоритмов управления и определения критического значения амплитуды упругих колебаний, при котором возникает неустойчивость движения (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов). Были предложены два типа алгоритмов демпфирования упругих колебаний. Эти результаты нашли практическое применение при проектировании и создании систем управления спутников связи на геосинхронной орбите серий «Радуга» и «Горизонт», спутников непосредственного телевидения серии «Экран», ряда большемерных спутников «Луч-1», «Луч-2» и др.

В последние годы [6] была решена проблема совместного оценивания координат движения ДКА на основе калмановской фильтрации и объединения этой теории и теории проверки статистических гипотез (В.М. Суханов, Т.В. Ермилова, А.С. Ермилов, В.Г. Борисов). Предложена дискретная адаптивная система управления ДКА и разработана методика ее исследования на основе дискретных аналогов теорем Ляпунова, при этом выполнен синтез алгоритма адаптации с помощью нечеткой логики (И.Н. Крутова, В.М. Глумов). Разработаны приближенные модели ДКА на основе оценки огибающей упругих колебаний (А.В. Силаев), предложена графовая модель ДКА (В.М. Суханов, И.Н. Крутова, В.М. Глумов).

3. АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МОДЕЛЮ

В 1957 г. в ИПУ по просьбе главного конструктора ОКБ «Факел» П.Д. Грушина начались работы по созданию теории бесперебойных самонастраивающихся систем (БСНС) управления для разрабатываемых в этом ОКБ ракет [1, 7]. В настоящее время эти системы в нашей и мировой литературе известны как адаптивные системы с моделью.

Были предложены два принципа построения БСНС (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова), метод синтеза основного контура на основе теории инвариантности (В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков, Б.В. Павлов), эвристические алгоритмы адаптации (В.Ю. Рутковский, И.Н. Круто-

ва), линеаризованные модели БСНС (И.Б. Ядыкин, И.Н. Крутова, Б.В. Павлов, В.С. Косиков), «ляпуновские» алгоритмы адаптации (В.Ю. Рутковский, С.Д. Земляков), критерий адаптируемости и частотный метод исследования БСНС (И.Б. Ядыкин). Разработаны структуры и теория БСНС для различных классов летательных аппаратов (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков, Б.В. Павлов, В.Н. Скорин-Чайков, В.М. Глумов, Т.В. Ермилова и др.).

На основе разработанной теории совместно с МОКБ «Радуга» и Московским институтом электромеханики и автоматики впервые в СССР были созданы адаптивные системы управления для нескольких классов ракет главного конструктора И.С. Селезнева. За создание принципов построения, теории и методов проектирования адаптивных систем управления, их серийное производство для классов ракет коллективу авторов в 1981 г. была присуждена Государственная премия СССР. От ИПУ были награждены Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков, Б.В. Павлов.

В настоящее время в ИПУ [1] продолжает развиваться теория адаптивных систем с моделью, теория систем координатно-параметрического управления. Предложены принципы настраиваемой работоспособности, концепция восстанавливаемой функциональной работоспособности и настраиваемой стратегии управления, развивается теория оптимальных адаптивных регуляторов для нелинейных многосвязных объектов, адаптивных регуляторов с элементами искусственного интеллекта и др. В качестве объектов управления рассматриваются, в основном, большие космические конструкции и свободно летающие космические роботизированные модули [8]. Решены задачи компьютерного вывода математических моделей таких объектов (С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский, В.М. Глумов, В.М. Суханов), предложены граф-модели множества допустимых траекторий сборки (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов). Предложены три стратегии адаптивного управления: управление на основе интеллектуальной диагностики состояния упругих колебаний конструкции, управление с оценкой фазы доминантной моды в момент переключения управления (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов) и управление на основе нечеткой логики (И.Н. Крутова, В.М. Глумов). Решена задача прецизионного и безопасного управления движением космического роботизированного модуля при мониторинге поверхности орбитальной станции (С.Д. Земляков, Д.А. Криво-ручко) и др.

4. РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Институт имеет устойчивые связи с предприятиями и организациями авиационного профиля. Временем поисков перспективных направлений развития вычислительной техники специального назначения были 1960-е гг. Потребовались новые теоретические разработки для внедрения цифровой вычислительной техники на борт летательных аппаратов. В Институте была выдвинута и разработана концепция построения узлов управляющих вычислительных машин из элементарных цифровых интеграторов (Ф.В. Майоров, Ю.В. Ковачич, В.В. Бельгий, А.М. Шевченко) [9]. Эта концепция была реализована в виде опытного образца ЦИМ-1, изготовленного на предприятии «Уфимский моторостроительный завод». Первый экземпляр ЦИМ-1 был принят Государственной комиссией в 1965 г. и прошел стадию опытной эксплуатации в Филевском филиале ЦКБМ.

Дальнейшим развитием линии цифровых управляющих машин была разработка архитектуры универсальной бортовой ЭВМ УМ-1. Эта ЭВМ была изготовлена на новом технологическом уровне в Ленинградском КБ-2. Разработка цифровых алгоритмов управления и их программирование осуществлялись в Институте. Один экземпляр УМ-1 был установлен на стенде в ЦИАМ им. П.И. Баранова. В процессе опытной эксплуатации имитировались разнообразные режимы полета, существенно меняющие динамику газотурбинного двигателя. Была выдвинута идея об адаптации частоты выдачи решений алгоритмов управления. Путем выбора оптимальной частоты загрузки процессора удалось снизить в 2—3 раза. Была разработана методика оценки погрешностей в цифровых системах с асинхронным квантованием.

Было проведено исследование архитектур и методов повышения отказоустойчивости бортовых вычислительных комплексов (Э.М. Мамедли, Н.А. Соболев, А.П. Курдюков). Результаты разработок в этой области были реализованы в бортовой системе управления первого отечественного космического аппарата многоразового использования «Буран».

5. ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Еще под руководством Б.Н. Петрова была начата разработка принципов построения, структур и методов реализации бортовых информационно-управляющих систем высокоресурсных автономных космических аппаратов для исследований комет, малых планет и спутников больших планет

Солнечной системы. В рамках этой проблемы самостоятельными направлениями были исследования по методам управления и технической диагностике бортовых ядерных энергоустановок и систем обеспечения целевых научных программ. Разработки ИПУ РАН в этой области (В.В. Бугровский, Д.А. Гольдин, И.А. Вогау) [10, 11] были реализованы в техническом проекте НПО им. С.А. Лавочкина по созданию космического аппарата с ядерным источником энергии и двигателями малой тяги для исследования пояса астероидов.

В настоящее время проводятся исследования в новой перспективной ветви теории управления — стохастической H_∞ -теории робастного управления (А.П. Курдюков, М.М. Чайковский) [12]. Полученные результаты позволяют повысить степень робастности по отношению к возмущениям при синтезе алгоритмов управления движением летательных аппаратов, что актуально для решения проблем повышения их безопасности и живучести.

Исследуются новые проблемы оценивания состояния технического объекта управления как нелинейной системы в аспекте анализа наблюдаемости и синтеза наблюдателей (К.Е. Старков). Изучаются геометрические структуры множества универсальных входов для полиномиальной пары «система — закон наблюдения».

Проводятся исследования в области создания интеллектуальных информационно-управляющих систем для сложных технических объектов и человеко-машинных комплексов (Д.А. Гольдин, А.М. Чесноков). Исследуются методы обеспечения интеллектуальной поддержки деятельности человека-оператора (членов экипажа, операторов бортовых систем и наземных комплексов управления) в быстро меняющейся обстановке при жестких ограничениях на время принятия решений, недостаточной априорной и недостаточно достоверной текущей информации. В этой области разрабатываются эффективные методы обучения и представления баз знаний, механизмы вывода и другие методы искусственного интеллекта, реализуемые в виде прикладных программных и инструментальных средств.

6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ

В части концептуальных, прогрессивных теоретических направлений работ Института лежит разработка энергетического подхода к управлению движением в пространстве (А.М. Шевченко, А.М. Чесноков). В основу этого подхода положено уравнение баланса энергий в системе «объект — силовая установка — внешняя среда». Оно связывает режим работы двигателей, аэродинамические



характеристики и ветровые возмущения, выражаемые в одних и тех же обобщенных координатах — в координатах удельной энергии. Задача управления сформулирована как задача минимизации целевой функции — отклонения энергетической высоты. На базе этого подхода разработана модифицированная энергетическая система управления полетом, которая в модельных экспериментах продемонстрировала явные преимущества перед традиционными системами для широкого класса самолетов в диапазоне масс от 10 (СУ-80) до 200 т (Ил-96). Кроме того, этот подход открывает возможность формировать директорный индекс для ручного управления тягой двигателей и генерировать сигналы оповещения об уровне ветровых возмущений. Результаты внедрены в Московском институте электромеханики и автоматики при проектировании систем управления полётом самолетов ТУ-154, ТУ-204, ИЛ-96, АН-148, С-80 и Ан-70.

В задачах управления движением любых подвижных объектов — морских, наземных, атмосферных, космических — важнейшей характеристикой объекта является его масса. Особое значение оценка массы приобретает при расследовании чрезвычайных происшествий. На основе энергетического подхода разработан метод объективного контроля массы самолетов по записям штатных бортовых регистраторов или по датчикам полетных параметров. Задача определения массы была поставлена как задача идентификации одного из параметров движущегося объекта. Достоинство энергетического метода вычисления массы состоит в том, что метод хорошо работает с сильно зашумленными измерениями, содержащими систематические погрешности. Это объясняется тем, что в вычислениях используются измерения на интервале или приращении измерений. Основные теоретические положения работы были реализованы при обработке записей бортовых регистраторов МСРП-64.

7. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Для решения задач навигации, управления движением и обеспечения безопасности летательных аппаратов актуальны исследования и разработка алгоритмического и аппаратного обеспечения бортовых систем навигации по естественным полям Земли, также проводимые в последнее время в Институте (Б.В. Павлов, А.К. Волковицкий, Е.В. Каршаков).

В 1998 г. в Институте начаты работы по созданию информационного обеспечения для обработки трёхмерных изображений поверхности Земли, полученных средствами дистанционного зондиро-

вания. В настоящее время разработанные программные продукты являются одними из лучших в мире, поскольку в алгоритмах реализованы оригинальные математические решения, позволяющие оптимизировать многие технологические процессы (Д.В. Тюкавкин, Н.Д. Беклемишев, В.В. Кекелидзе).

Предложены новые алгоритмы и методы интерполирования двумерных функций по случайному набору известных точек на основе калмановской фильтрации, которые по сравнению с ранее использовавшимися методами (кригинг, триангуляции Делоне и др.) более точные и производительные [13]. Разработан также специальный метод хранения регулярной структуры геопространственных данных с поддержкой возможности хранения больших объёмов данных и быстрого доступа к ним (А.И. Алчинов, Н.Д. Беклемишев, В.В. Костин, В.Б. Кекелидзе).

Получены новые научные и прикладные результаты в области обработки трёхмерных изображений, которые признаны учёными всего мира и широко используются на практике, в частности при решении задач управления объектами аэрокосмической техники.

В настоящее время ведутся работы по исследованию и разработке методов обеспечения полётов над местностью со сложным рельефом на базе использования оцифрованных картографических данных. Полученная геоинформационная система может быть использована в системе оперативного принятия решений.

Созданы программные продукты, которые в полном объёме и с высоким качеством решают все технологические задачи по обработке аэрокосмических материалов (А.И. Алчинов, Н.Д. Беклемишев, В.Б. Кекелидзе, А.Б. Подловченко). Программные продукты могут быть установлены на очень удобных для работы оператора персональных компьютерах, а также карманных персональных компьютерах, с помощью которых решаются практические задачи информационного обеспечения управления объектами космической и авиационной техники.

Продолжается интенсивное развитие программного продукта «Талка» и в целом цифровой фотограмметрической станции. Реализуются уникальные возможности, заложенные в разработанные продукты. Новые алгоритмы и технические решения отличаются высокой оперативностью и точностью обработки трёхмерных изображений, что позволяет значительно сократить трудовые и временные затраты при создании карт и планов для информационного обеспечения управления движущимися объектами.



На международной выставке «International Exhibition of Inventions, New Techniques and Products» (г. Женева, Швейцария) перечисленные результаты в составе единой российской экспозиции отмечены бронзовой (2008 г.), золотой и серебряной (2009 г.) медалями. На 6-й Международной выставке изобретений, новой техники и товаров (г. Сучжоу, Китай, 16–19 октября 2008 г.) представленные Институтом результаты отмечены серебряной и бронзовой медалями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы Института в области управления космической и авиационной техники получили широкую известность в нашей стране и за рубежом. Они сыграли большую роль в развитии космонавтики в нашей стране, в развитии теории и практики построения адаптивных, терминальных и оптимальных по критерию H_∞ -систем управления летательными аппаратами различных классов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Институту проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН — 65 лет / Под ред. И.В. Прангишвили.* — М.: ИПУ, 2004. — 424 с.
2. *Портнов-Соколов Ю.П., Присс Г.М.* Предыстория бортового комплекса системы управления ракеты Р-7 // *Автоматика и телемеханика.* — 1999. — № 6. — С. 31–42.
3. *Анализ внештатной составляющей равномерных погрешностей в системе управления расходом топлива ракеты-носителя / А.Я. Андриенко, М.И. Заплатин, В.М. Куртовой, А.И. Чадаев // Датчики и системы.* — 2009. — № 6.
4. *Андриенко А.Я., Лосев Е.П., Тропова Е.И.* Совершенствование алгоритмов действия расходомерных контуров системы управления ракеты-носителя // *Проблемы управления.* — 2009. — № 4. (В печати.)
5. *Андриенко А.Я., Чадаев А.И.* Анализ возможностей усиленно-гравитационной стабилизации низкоорбитальных спутников // *Космические исследования.* — 1998. — Т. 36, № 4. — С. 391–398.
6. *Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Проблемы нелинейного управления ориентацией деформируемых космических аппаратов. 1. 2 // *Мехатроника, автоматизация, управление.* — 2006. — № 9. — С. 6–14; № 10. — С. 15–24.
7. *Рутковский В.Ю.* Работы Института проблем управления в области беспоисковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // *Автоматика и телемеханика.* — 1999. — № 6. — С. 42–49.
8. *Models and control methods by large space structures / V.Yu. Rutkovsky, V.M. Sukhanov, S.D. Zemlyakov, V.M. Glumov // Intern. Conf. on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace (ICNPAA-2008) / Mathematical Problems in Engineering in Aviation and Aerospace. 25 — 27 June 2008. Plenary papers. CD-ROM.*
9. *Шевченко А.М., Мамедли Э.М., Струков Ю.П.* Бортовые вычислительные системы // *Итоги науки и техники / Сер. «Авиационное». — М.: ВИНТИ, 1976.*
10. *Интеллектуальные системы автономных аппаратов для космоса и океана и метод технико-биологических аналогий / В.В. Бугровский, И.А. Вогау, Д.А. Гольдин и др. — М.: ИПУ, 1997. — 214 с.*
11. *Курдюков А.П.* Построение оптимальных робастных регуляторов при действии внешних возмущений / В кн.: «Методы классической и современной теории автоматического управления» в трёх томах, т. 3 «Методы современной теории автоматического управления». — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — С. 193–250.
12. *Кульба В.В., Микрин Е.А., Павлов Б.В.* Проектирование информационно-управляющих систем долговременных орбитальных станций. — М.: Наука, 2002. — 343 с.
13. *Алчинов А.И., Беклемишев Н.Д., Кекелидзе В.Б.* Методы цифровой фотограмметрии. Технология «Талка». — М.: МГУП, 2007. — 260 с.



Рутковский Владислав Юльевич — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией координатно-параметрического управления динамическими системами ИПУ, действ. член Академии нелинейных наук, лауреат Государственных премий СССР, заслуженный деятель науки РФ. Председатель секции «Управление подвижными объектами и навигация» Ученого совета ИПУ, член редколлегии журналов «Автоматика и телемеханика» и «Проблемы управления». Более 55-ти лет работает в области теории адаптивного управления подвижными объектами. ☎(495) 334-87-30, ✉rutkov@ipu.ru.



УДК 658.512.011.56:004.42

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

М.Х. Дорри

Рассмотрены этапы развития автоматизированных систем управления кораблями, отражена роль Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН в решении общих проблем автоматизации морских подвижных объектов. Указаны перспективные направления исследований.

Ключевые слова: автоматизация, системы управления, морские подвижные объекты.

ВВЕДЕНИЕ

Трудно переоценить ту роль, которую играет автоматизация управления морскими подвижными объектами (МПО) для обеспечения эффективного функционирования кораблей в нормальных и аварийных ситуациях. Управляющие системы фактически являются мозговым центром корабля. Именно в них формируются нужные сигналы, посылаемые в различные подсистемы, благодаря которым удается достичь поставленных целей путем выполнения определенной последовательности операций. В процесс управления, как правило, включается человек-оператор. Он обладает многими полезными качествами: способностью оценить ситуацию по многим косвенным признакам, возможностью накапливать опыт управления, способностью изменять цели управления и принимать нетривиальные решения благодаря имеющимся знаниям. Однако человек не всегда способен быстро и оперативно принимать решения в стрессовых ситуациях. Операторы могут совершать ошибки, порой приводящие к трагическим последствиям, и тогда говорят о человеческом факторе как о причине катастрофы. Но в ошибках виноваты не только операторы и не только командиры, принимающие неверные решения. Во многих случаях ответственность лежит и на проектировщиках управляющих систем, которые не смогли должным образом организовать взаимодействие человека с аппаратно-программными средствами МПО.

С появлением современных вычислительных средств многие функции, ранее осуществляемые человеком, стало возможно передавать интеллектуальным системам управления. Информацию стали структурировать и подавать в наглядном и

удобном виде, облегчающем принятие рациональных решений. Сокращается численность персонала, обслуживающего МПО. Однако на пути автоматизации МПО предстоит сделать еще немало, ее история пока еще совсем недолгая, и ее стремительное развитие еще впереди.

В статье рассмотрены в историческом плане этапы развития автоматизированных систем управления (СУ) кораблями и роль Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН в решении общих проблем автоматизации морских подвижных объектов. Указаны важные нерешенные проблемы и перспективные направления исследований.

1. ПОЯВЛЕНИЕ АВТОРУЛЕВЫХ НА РАННИХ СТАДИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ КОРАБЛЕЙ

Автоматизацией управления кораблями начали заниматься в начале XX в. На первых порах она ассоциировалась с управлением движением, которое требовало от судоводителя не только подготовленности, но и большого искусства. Многие суда неустойчивы на курсе, математические модели движения кораблей сильно разнятся и меняются в процессе плавания, а реакция корабля на воздействия исполнительных органов замедленна. Управляющие воздействия на порядок слабее возмущений от развитого морского волнения, а для военных кораблей от сил, возникающих при выполнении боевых задач. Все это затрудняет управление кораблем, особенно в специфических режимах, таких как швартовка, расхождение с препятствиями и др.

Первые успехи были достигнуты на пути создания авторулевых транспортных судов. В авторуле-



вом, предложенном А.И. Мускаром в 1921 г. [1], источником информации о направлении движения судна служил магнитный компас, подвижная магнитная система которого была дополнена зеркальцем угла поворота. Световой луч, отражаясь от него, поступал на блок светочувствительных элементов и формировал сигнал отклонения руля на угол, пропорциональный уходу судна от заданного курса. Аналогичные устройства были предложены и в изобретениях других авторов. Фактически в подобных авторегуляторах управление осуществлялось пропорциональным П-регулятором (терминология появилась позже). Эти устройства могли использоваться только для легких судов, устойчивых на курсе. В СССР были разработаны авторулевые подобного типа («Янтарь», «Зубатка» и др.) для управления торпедными катерами и малыми судами.

Вскоре после второй мировой войны фирмы «Sperry» (США) [2] и «Anschutz» (Германия) [3] начали серийный выпуск авторулевых с П-законом управления, дополненным нелинейным звеном. С развитием теории регулирования стало ясно, что введенный в цепь обратной связи люфт по углу перекадки руля — это грубый аналог сигнала угловой скорости судна.

Заметим, что судоводители воспринимали авторулевые с осторожностью и настаивали на сохранении, параллельно с ними, чисто ручного управления.

Широкое распространение авторулевых стало возможным только с развитием теории регулирования, в частности, методов проектирования ПИ- и ПИД-регуляторов. Очень важным обстоятельством стало также появление новой технической и технологической базы — надежных аналоговых счетно-решающих элементов.

Вклад ИПУ РАН в развитие общей теории автоматического управления огромен. В Институте работали многие известные ученые, исследования которых легли в основу теории управления (среди них М.А. Айзерман, М.А. Гаврилов, С.В. Емельянов, А.М. Летов, Б.Н. Петров, В.С. Пугачев, А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин).

Во второй половине XX в. в СССР была разработана большая серия авторулевых под шифрами «Самшит» и «Альбатрос» для сторожевых кораблей и эсминцев, для транспортных судов — авторулевые АБР, АР и АТР, а позднее авторулевые «Аист» и «Печора» для морских и речных судов [4]. В дальнейшем во всем мире стали разрабатываться адаптивные системы управления движением с использованием значений прогнозируемых фазовых координат и результатов диагностики состояния МПО.

2. ПЕРЕХОД К КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Масштабное проникновение автоматизации во все сферы управления морскими подвижными объектами и попытки организовать взаимодействие различных по функциям подсистем приходится на период Второй мировой войны и послевоенное время. Ряд стран (СССР, США, Япония, Норвегия) приступили к разработке комплексных систем управления. Такие системы были особенно востребованы для стабилизации буровых судов и платформ в заданной точке океана, поскольку для управления ими надо было учитывать данные о воздействии силы ветра, течений и т. п.

На этапе развития комплексной автоматизации МПО Институт проблем управления сыграл существенную роль в формулировке целей и задач автоматизации и выборе методов их реализации.

Бурное развитие направления в конце 1950-х гг. в Институте было обусловлено работами по автоматизации атомных подводных лодок (АПЛ) проекта 705 (получивших в печати наименование «Голубой кит»). Этот период заслуживает отдельного рассмотрения. Тогда по предложению президента АН СССР А.П. Александрова была поставлена задача создания кораблей и подводных лодок, тактико-технические характеристики которых значительно превосходили бы характеристики существующих. Достаточно упомянуть требование сокращения численности операторов АПЛ, управляющих оборудованием и системами, более чем в три раза.

В области автоматизации систем управления подводными лодками решение поставленной задачи было поручено директору Института проблем управления академику В.А. Трапезникову. Выполненные Институту под его руководством работы положили начало новому этапу автоматизации кораблей. Совокупность принятых и осуществленных решений изменила отношение проектировщиков кораблей к автоматизации и роли систем управления в обеспечении маневренности, отказоустойчивости и живучести морских подвижных объектов. Была продемонстрирована важность автоматизации для повышения боевой мощи подводных лодок.

Выработанные в те годы принципы автоматизированного управления охватывали такие разделы как:

- управление движением;
- управление атомными энергетическими установками;
- управление техническими средствами;
- создание системы диагностирования неисправностей и методов их устранения;



- разработка противоаварийных систем и управления в нештатных режимах функционирования;
- автоматизация проектирования и испытания систем с помощью аналоговых и дискретных средств;
- создание электронных стендов комплексной отладки подсистем;
- использование тренажеров и прототипов для подготовки личного состава.

Были сформулированы общие проблемы построения управляющих систем многоагрегатными техническими комплексами, актуальные и для современной практики автоматизации (см. статью Б.Г. Волика [5], который был в то время заместителем В.А. Трапезникова по научному руководству работами, связанными с комплексной автоматизацией АПЛ).

Строительство АПЛ велось под наблюдением ЦНИИ МО, и в нем участвовали ведущие институты и КБ страны, в том числе ФГУП НПО «Аврора», СПМБМ «Малахит», ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, ФЭИ, Горьковское ОКБМ, ВНИИЭМ, МНИИ1 и многие другие предприятия.

Между организациями и предприятиями установились тесные творческие научные связи, благодаря чему проект АПЛ 705 был успешно завершен к 1971 г. и получил очень высокую оценку не только в нашей стране, но и за рубежом, где появление АПЛ вызвало шок в военно-морских кругах Запада [6, 7]. Основную роль в реализации комплексной автоматизированной системы управления сыграло ФГУП НПО «Аврора».

Надо сказать, что многие принятые тогда решения определили на многие годы тенденции развития систем управления морскими подвижными объектами. После принятия подводной лодки проекта 705 на вооружение сотрудники Института проблем управления были отмечены правительственными премиями и государственными наградами. Среди них: Ленинская премия (В.А. Трапезников), Государственная премия (Д.И. Агейкин, А.Ф. Волков), орден Октябрьской Революции (Д.И. Агейкин), орден Трудового Красного Знамени (С.И. Бернштейн, Б.Г. Волик), орден «Знак Почета» (В.А. Ведешенков, И.Е. Декабрун, Г.Э. Острцов), медаль «За трудовую доблесть» (Ф.Б. Гулько, Г.Г. Молчанов), медаль «За трудовое отличие» (М.Х. Дорри, М.Г. Тахтамышев).

В результате выполненных работ по автоматизации АПЛ проекта 705 Институт завоевал себе высокий авторитет.

По инициативе академика В.А. Трапезникова в 1969 г. был организован Межведомственный совет по управлению движением морских судов и специальных аппаратов. Основная задача, которая была поставлена перед Межведомственным сове-

том — это координация научно-производственной деятельности в СССР по автоматизации управления подвижными объектами. Бесменным секретарем совета по сей день является заслуженный изобретатель России Г.Э. Острцов. В ежегодных конференциях (в 2008 г. прошла 35-я конференция) принимают участие специалисты от многих ведущих организаций и предприятий России. На них обсуждаются насущные проблемы автоматизации управления МПО.

В 1970—1980-е гг. по постановлениям Правительства СССР был выполнен цикл работ по развитию идей автоматизации кораблей новых проектов. Была разработана концепция иерархического построения и функционального взаимодействия подсистем управления (Б.Г. Волик, Б.Б. Буянов, Н.В. Лубков). Был выполнен цикл работ по теоретическому обоснованию возможности повышения скрытности АПЛ благодаря коррекции законов управления механизмами (Г.Г. Гребенюк, С.М. Никишов, И.М. Рудько, А.И. Шахорин). Теоретические результаты были подтверждены математическим моделированием и на расширенных акустических испытаниях действующих АПЛ на полигонах в Белом море. Ряд сотрудников были привлечены для научного руководства автоматизацией новой серии атомных ледоколов («Арктика», «Сибирь»), а также новых серий супертанкеров и контейнеровозов (Б.Г. Волик, Г.Г. Гребенюк, М.Х. Дорри, А.С. Степанянц). Институт принимал участие в разработке системы автоматического управления движением экраноплана «Смена» [8]. Был выполнен ряд исследований по улучшению маневренных характеристик надводных кораблей и подводных лодок.

3. НОВЫЕ ВРЕМЕНА — ПЕРЕХОД К МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКЕ

Вторая половина двадцатого века ознаменовалась стремительным развитием цифровой вычислительной и микропроцессорной техники. Управляющие машины, программируемые контроллеры и компьютеры совершили революцию в автоматизации систем управления и в корне изменили характер разработок. Это изменение возникло, в основном, вследствие отделения вычислительного процесса, осуществляемого, как правило, программными средствами, от аппаратных средств, реализуемых на различных семействах микропроцессоров. Благодаря ЭВМ появилась возможность реализации широкого класса алгоритмов без изменения технических средств, а также возможность тестирования и диагностирования аппаратуры независимо от алгоритмов их функционирования. Другими словами, стало возможным комплекс-





ровать аппаратные средства независимо от организации вычислительного процесса.

Другая важная особенность проникновения микропроцессорной техники в технологию создания систем управления заключалась в том, что появились колоссальные возможности по совершенствованию законов управления, созданию интегрированных автоматизированных систем, резервированию, оптимизации, представления информации операторам и др.

К концу XX в. наметились следующие тенденции в автоматизации МПО:

- переход к распределенным и децентрализованным архитектурам систем управления на базе микропроцессорной техники;
- интеллектуализация приборов, средств и систем контроля и управления;
- применение в управлении методов искусственного интеллекта;
- использование для отображения информации мониторов и графических станций;
- управление с помощью визуального интерфейса;
- применение спутниковых навигационных систем.

Новая техника требовала иной технологии разработки систем, базирующейся на широком применении средств автоматизированного проектирования и моделирования, позволяющих создавать рабочие программы для микропроцессоров и управляющих ЭВМ. Был необходим тщательный анализ переходных процессов на стадиях разработки алгоритмов и программ функционирования регуляторов и дискретных элементов с учетом таких факторов, как квантование по времени и уровню, частота опроса датчиков, а также решение вопросов, связанных с резервированием, загруженностью магистралей и др.

К сожалению, технология построения крупных цифровых систем управления не была в достаточной степени развита. Без специально создаваемых инструментальных средств процесс разработки крупных взаимосвязанных систем управления затягивался, страдало качество проектов, возрастала вероятность принятия недостаточно обоснованных решений. Окончательную доводку алгоритмов подчас приходилось производить на борту действующего корабля в авральном режиме.

Современные средства вычислительной техники позволяют создавать очень надежные, отказоустойчивые системы управления со встроенными подсистемами интеллектуального управления, однако до сих пор эти ресурсы используются крайне слабо. Алгоритмы управления, как правило, имитируют работу аналоговых систем управления, не позволяющих реализовывать сложные алгоритмы, сжимать информацию и наглядно отображать си-

туацию на основе методик выбора достоверной информации и анализа поступающих сигналов.

Проблема создания комплексных интегрированных систем управления до сих пор решается крайне медленно, несмотря на то, что на предприятиях есть полное понимание ее важности. Причина заключается в разнородности программного обеспечения, создаваемого различными предприятиями, отсутствии достаточно адекватных инструментальных средств и методов, позволяющих комплексно исследовать взаимодействие подсистем еще на стадии их разработки. Фактически отсутствуют или недостаточно эффективны методы и программные инструментальные средства разработки сложных многоцелевых объектов управления. Разработка комплексных автоматизированных систем управления встречает на своем пути большие трудности.

Представляется, что за рубежом технологии построения современных автоматизированных систем уделяется гораздо больше внимания, чем на наших предприятиях, занимающихся автоматизацией управления МПО.

В конце XX в. произошел технологический прорыв в области спутниковой навигации, изменивший во многом подход к вопросам управления движением МПО. Наличие приемника спутниковой связи позволяет с достаточной точностью определять фазовые координаты кораблей и меняет подход к комплексной автоматизации. Появились новые источники информации, которые должны учитываться при выборе алгоритмов и структуры автоматизированной системы управления. Однако имеются и опасения при ориентации систем управления движением только на данные от спутниковой навигации, вызванные возможностями сбоев в получении информации. В настоящее время преобладает мнение о целесообразности для повышения отказоустойчивости сохранять традиционную систему управления наравне с использованием новых источников информации от приемников спутниковой навигации.

В 1990-х гг. направление автоматизации управления морскими подвижными объектами в Институте проблем управления испытало период спада. Причиной спада явились политические события, вызвавшие ослабление контактов с ведущими предприятиями страны, разрабатывающими системы управления. Были упущены возможности взаимодействия по ключевым вопросам перехода на микропроцессорную технику. Тем не менее, работы не прекращались. Институт принял участие в создании международной Академии навигации и управления движением. Ее действительными членами стали, в частности, сотрудники, занимающиеся проблемами управления МПО (Б.В. Павлов,



М.Х. Дорри, Г.Э. Острецов). В Институте сохранился научный потенциал, и в настоящее время получены новые интересные результаты, о которых речь пойдет далее.

4. НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Несмотря на крупные успехи в области автоматизации МПО, нельзя признать состояние решения проблемы удовлетворительным. Имеются, на наш взгляд, резервы улучшения характеристик МПО, которые могут материализоваться в результате построения более эффективных автоматизированных систем управления.

В настоящее время при создании систем управления МПО все больше стали обращать внимание на обеспечение отказоустойчивости и живучести объектов, а не на управление в штатных режимах, которое было неплохо отработано. Вопросы надежности функционирования движущихся объектов важны всегда, но особенно актуальны в военной обстановке, где нештатные и аварийные режимы могут возникать в самых неожиданных ситуациях. К характеристикам, которые во многом зависят от правильного построения системы управления и определяют важные тактико-технические показатели МПО, относятся маневренность, надежность и живучесть. Эти характеристики должны отвечать современным требованиям не только в штатных режимах функционирования, но и в экстремальных условиях.

Достичь нужного уровня тактико-технических свойств объектов МПО возможно только при комплексном рассмотрении всех подсистем как единого целого и использовании информации от них для выбора оптимального решения.

Например, сохранение жизнедеятельности АПЛ в критических ситуациях требует достаточной маневренности (особенно важна скорость движения), которая зависит от обеспечения энергией всех агрегатов АПЛ. С другой стороны, известно, что температурные напряжения отрицательно влияют на работу тепловыделяющих элементов ядерного реактора и других элементов конструкции. Скорость изменения температуры является основной причиной появления температурных напряжений, ускоряющих износ материалов. Имеются и другие факторы, из-за которых разработчики и проектировщики атомных реакторов прилагают все усилия к ограничению скоростей изменения нейтронной мощности реактора. Необходимо найти нужный баланс между скоростью изменения мощности ядерной энергетической установки и маневренными характеристиками АПЛ с учетом обстановки, которая может быть настолько серьез-

ной, что будет грозить потерей живучести корабля. Линейное задание на изменение нейтронной мощности реактора и расхода теплоносителя, принятое в настоящее время для управления процессом изменения мощности, может быть улучшено. Путем анализа данных нескольких подсистем можно обеспечить быстрый и более плавный температурный режим перехода энергетической установки на другие мощности.

В условиях традиционного разделения функциональных комплексов технических средств часто не только не прослеживается их взаимодействие, но наблюдается неоправданное дублирование одних и тех же функций в разных подсистемах и в автономно действующих процессорах, что приводит к завышению потребной вычислительной мощности. Это ведет к увеличению массогабаритных показателей и, как следствие, к дополнительной стоимости системы управления.

Очень важно обратить внимание на необходимость предвидеть возможность отказа наиболее существенных для работы объекта элементов, поиска отказавшего оборудования и синтеза в реальном времени новой работоспособной конфигурации системы управления.

Построение современных систем управления, учитывающих указанные обстоятельства, требует разработки и усовершенствования методов сбора, хранения и сжатия информации, а также разработки новых алгоритмов и инструментальных средств, позволяющих определять границы изменения параметров, при которых следует реконфигурировать систему управления. Новые подходы к построению СУ существенно повысят надежность и живучесть МПО.

Имеются несколько проблем, решение которых лежит в русле основных направлений развития автоматизации управления МПО и которыми занимаются в Институте проблем управления. О них пойдет речь в данном разделе. По нашему мнению, было бы полезно использовать научный потенциал Института и имеющиеся полезные разработки при проектировании новых и модернизации действующих кораблей. Рассмотрим кратко указанные направления.

1. Переход на архитектуру сетевых решений (работы ведутся под руководством А.И. Иванова). В современных средствах вычислительной техники наблюдается революционный переход на архитектуру сетевых решений.

С повышением быстродействия в параллельных шинах возникают серьезные проблемы, связанные с помехоустойчивостью, появлением наводок, возникновением сбоев и потерями данных, что ограничивает дальнейший рост производительности.



Этим объясняется интенсивная конвергенция сетевых решений и средств вычислительной техники. Использование сетевой архитектуры вместо магистрально-модульной организации позволяет существенно повысить быстродействие, упростить внутренние связи между компонентами.

Поэтому при разработке корабельных систем управления новых поколений встает очень серьезная проблема отхода от традиционных решений и перехода на современную сетевую архитектуру.

В теоретических работах сформулированы основные принципы функционально-топологического анализа и синтеза распределенных систем управления, разработаны математические модели оптимизации топологии средств вычислительной техники и информационных трактов; разработаны типовые структурные решения мультипроцессорных реконфигурируемых комплексных СУ на перспективных функциональных элементах.

Для повышения эффективности системы мониторинга средств вычислительной техники были предложены: мультисетевой метод, метод альтернативных каналов, метод асимметричного дублирования, метод репликации данных в реальном времени.

Совместно с предприятиями кораблестроительной отрасли были изготовлены и испытаны опытные образцы системы, внедряемой в настоящее время на корабле.

В развитие этого направления ведутся работы по созданию СУ малых автономных необитаемых подвижных аппаратов, расширяющих возможности сил спасения и одновременно обеспечивающих решение задач экологии, гидрографии, а также разведки и защиты от потенциального противника.

Цель ряда исследований, проводимых в Институте, состоит в разработке новых принципов построения корабельных информационно-управляющих систем на базе беспроводных сетей.

2. Создание перспективных систем управления морскими подвижными объектами и тренажерных систем (см. статью [9] в настоящем выпуске журнала).

3. Создание полномасштабного стенда для разработки и отладки алгоритмического и программного обеспечения бортовых управляющих комплексов, (работы ведутся под руководством М.Х. Дорри и А.А. Рощина). Еще в 1980-х гг. в рамках темы «Корсар» были разработаны основные принципы построения стендов для полунатурного моделирования процессов управления. Несколько лет назад Институт ставил задачу создания центра для разработки достаточно универсальных моделей подводной лодки (ПЛ) объектов в ее составе и гибкого программного обеспечения, помогающего не только оперативно изменять параметры, но и

видоизменять сами модели объектов, сравнивать эффективность тех или иных структурных схем и алгоритмов управления и давать экспертные оценки по вопросам целесообразности их доработки и улучшения. Такая работа не получила тогда должной поддержки вследствие межведомственных преград.

В Институте предложены основы новой технологии разработки сложных систем управления, позволяющей на ранних стадиях проектирования создавать алгоритмы управления и анализировать взаимодействие подсистем. Созданы теоретические основы построения специализированных инструментальных программных средств визуального интерфейса на основе блочно-иерархического структурирования задачи, объединения расчета непрерывных и логических процессов, наглядного представления объектов, организации многоуровневого взаимодействия блоков между собой и с системой, взаимодействия инструментальной системы с базами данных и модулями, имитирующими исследуемые объекты и помогающими легко реконструировать решаемые задачи.

Конечно, в арсенале организаций судостроительной промышленности существуют исследовательские стенды для разработки и моделирования корабельных СУ, но они являются уникальными программными продуктами и, по нашему мнению, обладают рядом недостатков. Основные из них, помимо высокой стоимости, состоят в недостаточной универсальности, невозможности использования на аналогичных объектах без серьезных доработок, для осуществления которых необходимо привлекать высококвалифицированных программистов, и недостаточной информационной поддержке проектировщиков при создании алгоритмов управления.

Институт проблем управления подготовил фундамент в виде специальных программных инструментальных средств, свободных от указанных недостатков. Они дают возможность строить полномасштабные стенды, на которых можно анализировать и разрабатывать алгоритмы управления в различных режимах работы МПО и возникающих аварийных ситуациях, а также осуществлять подготовку операторов.

Созданный в Институте программный комплекс РДС (Расчет Динамических Систем) [10, 11] позволяет:

- создавать универсальные и гибкие стенды, легко перестраиваемые под различные типы кораблей и различные пульты управления;
- предоставлять исследователям и операторам виртуальную среду разработки, наглядно демонстрирующую последствия воздействия тех или иных возмущений и сбоя в аппаратуре;



- упростить процесс подготовки программных модулей для введения их в комплексный стенд;
- строить модели стендов для обучения операторов с имитацией различных аварийных ситуаций и использовать его в качестве тренажера-прототипа;
- существенно сократить время проектирования автоматизированных систем управления;
- разрабатывать и проверять алгоритмическое и программное обеспечение для современных СУ морскими подвижными объектами, работая с реальными устройствами в режиме полунатурного моделирования;
- применять современные методы теории управления к разработке и совершенствованию систем управления движением кораблей.

Некоторые фрагменты визуального отображения пультов операторов ПЛ, выполненные на комплексе РДС, представлены на рис. 1 и 2 (см. вклейку к с. 102).

Как показали выполненные исследования в области построения СУ движением и результаты использования комплекса для отображения процессов на пультах операторов, РДС существенно упрощает процесс проектирования и формирования новых законов управления движением, а также позволяет решать задачи взаимосвязанного управления с энергетической системой, общей корабельной системой и другими подсистемами корабля.

4. Работы по обеспечению информационной поддержки операторов центрального пульта управления движением как в режимах эксплуатационного, так и противоаварийного управления. В рамках этого направления, тесно связанного с первым, должны быть модернизированы пульта управления и построены обучающие программы для решения различных ситуационных задач. В том числе должны быть выработаны эталонные способы управления с оценкой их качества. Командира ПЛ необходимо обеспечить полной информацией для принятия правильных решений при маневрировании, в режимах малошумного хода, при залповой ракетной стрельбе и др.

5. «Интеллектуализация» управления, повышающая безопасность и увеличивающая маневренность надводных кораблей и ПЛ (работы ведутся под руководством М.Х. Дорри и М.Г. Тахтамышева). В Институте рассматривалась группа задач, в которых оператору приходится брать управление объектом на себя. К ним относятся некоторые задачи противоаварийного управления, а также ряд задач управления объектом в условиях действия внешних возмущений. Для этих режимов особенно актуальна задача информационного обеспечения оператора в процессе управления МПО, вклю-

чая оценку текущего состояния объекта и прогноз движения МПО при различных наборах используемых технических средств.

Особенность рассматриваемой группы задач заключается в том, что часть координат, характеризующих состояние объекта, не поддается количественной оценке.

Для оценки состояния объектов в том случае, когда часть информации поступает в «четкой», а часть в «нечеткой» форме, применяется метод нечеткого описания текущей ситуации, на основании которого и формируется в дальнейшем управление объектом. В подходе к разработке ситуационных управляющих систем широко используется опыт квалифицированного оператора при построении модели процесса управления.

Важное место при синтезе современных СУ занимает задача фильтрации и восстановления не измеряемых непосредственно координат. В результате проведенных исследований была определена структура фильтра, включающая в себя подстраиваемую (по сигналу рассогласования) модель внешних возмущений, и позволяющая получить высокое качество восстанавливаемых координат, в том числе действующих на МПО внешних сил и моментов.

Наличие в структуре фильтра подстраиваемой модели внешних возмущений позволяет достаточно эффективно решать задачу прогнозирования изменения состояния МПО. Решение задачи прогнозирования особенно актуально как для режимов противоаварийного управления, так и для режима стабилизации МПО при действии волновых возмущений, когда интенсивность изменения уровня волновых воздействий существенно выше компенсирующих воздействий руля. Для обеспечения хорошего качества процесса стабилизации на заданном интервале времени необходимо иметь суммарные прогнозируемые уровни волновых воздействий на этом интервале.

6. Комплексный подход к управлению, включающий в себя навигацию, энергетику и управление движением (работы ведутся под руководством М.Х. Дорри). Развиваются методы сжатия информации и наглядного отображения ситуаций на основе выбора достоверной информации по анализу поступающих сигналов от нескольких подсистем и декомпозиции системы управления. При этом с допущением ухудшения качества процессов достигается выполнение основной задачи управления при сохранении живучести объектов.

В ходе проведенных исследований рассматривалась задача выбора оптимального сочетания используемых технических средств с учетом ограничений по мощности и быстродействию для обеспечения требуемой точности стабилизации при



действию различных возмущений, а также задача формирования алгоритмов управления выбранными средствами. Эти алгоритмы относятся как к нормальным режимам, включая режимы движения ПЛ без хода, так и к аварийным ситуациям. Для переходов ПЛ по глубине без хода предложены новые оригинальные алгоритмы управления.

На основе полученных результатов по решению задачи фильтрации и выработке прогноза состояния МПО разработано программное обеспечение для выдачи оператору рекомендаций по управлению объектом.

7. Теоретические исследования по обнаружению и классификации МПО в условиях помех (работы ведутся под руководством А.В. Добровидова). Наряду с задачами автоматизации в Институте интенсивно развивалось направление, связанное с обнаружением МПО в условиях помех по различным физическим полям сигналов. Акустические поля МПО в водной среде порождали задачи гидролокации, а аномалии на водной поверхности, генерируемые подвижными МПО, приводили к задачам обнаружения по следам подводных лодок в радиолокационном и оптическом диапазонах электромагнитных волн. Совместно с Институтом космических исследований РАН на полигоне в Тихом океане были записаны на фото пленку отраженные от морской поверхности радиолокационные сигналы, генерируемые боковой антенной самолета. Цель обработки фото пленки состояла в выделении аномальных областей водной поверхности, вызванных движением МПО. Впервые в СССР был разработан метод записи отраженного радиолокационного сигнала на бытовой видеоманитофон. Удалось построить алгоритм сегментации, позволивший достаточно надежно различать слабые аномалии на фоне взволнованной морской поверхности. Проверка этого алгоритма на результатах натурных испытаний оказалась обнадеживающей.

Вопросы обнаружения МПО по акустическим полям решались в конце 1980-х начале 1990-х гг. На основе теории оптимальных статистических решений был построен алгоритм обнаружения, который должен был работать в режиме «on-line», обрабатывая многомерную информацию от больших акустических антенных решеток. Серьезная работа по разработке языка параллельных вычислений и программированию на нем алгоритмов обнаружения была поручена И.И. Паишеву, который в 1992 г. выполнил задание и успешно сдал работу государственной комиссии. Многие из сотрудников, участвовавших в этой теме, до сих пор сохранили опыт работы с большими массивами данных для решения такого рода важных государственных задач.

В настоящее время в Институте продолжают теоретические исследования по обнаружению и классификации МПО. В отличие от прежних работ в этом направлении рассматриваются более реалистичные ситуации, когда характеристики внешних случайных воздействий и параметры модели объекта неизвестны и должны быть восстановлены в режиме нормальной эксплуатации. Интенсивно развивается непараметрический подход к задачам оценивания и управления, когда функциональная форма модели объекта вообще неизвестна. Такой подход порождает класс адаптивных стохастических систем управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния автоматизации морских подвижных объектов по материалам отечественных и зарубежных публикаций позволяет выделить следующие тенденции и направления развития автоматизированных систем управления:

- применение в управлении методов искусственного интеллекта;
- управление с помощью визуального интерфейса; использование для отображения информации мониторов и графических станций;
- развитие технологии разработки и отладки алгоритмического и программного обеспечения бортовых управляющих комплексов;
- включение в управление информации от спутниковых навигационных систем;
- развитие методов сжатия информации и наглядного отображения ситуаций на основе методики выбора достоверной информации по анализу всех поступающих сигналов;
- существенное развитие информационной поддержки операторов центрального пульта управления движением;
- комплексный подход к управлению, включающий в себя навигацию, энергетику и управление движением;
- совершенствование алгоритмов маневрирования ПЛ без хода, а также маневров по скрытности и уходу в безопасные зоны;
- совершенствование программ автоматического противоаварийного управления;
- переход на архитектуру сетевых решений.

Автоматизация систем управления МПО стала неотъемлемой частью проектов современных кораблей, несмотря на то, что она сама иногда порождает ряд проблем, вытекающих из недостаточной продуманности и надежности системы.

В настоящее время вопросам безотказности существующих систем управления и надежности элементной базы уделяется очень большое внимание. Однако остается ряд нерешенных проблем.



Опираясь на успехи науки и техники в таких областях, как интеллектуализация, визуализация процессов, роботизация и многих других, можно ожидать наступления существенного прогресса в совершенствовании автоматизированных систем управления МПО.

Развитие автоматизации невозможно остановить — она проникает во все сферы человеческой деятельности. Что касается морских подвижных объектов, то для них всегда будет актуален лозунг: «Быстрее, сильнее, глубже», и в достижении этих целей автоматизация управления будет играть ключевую роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. № 991 СССР / А.И. Мускар. — 1921 г.
2. Информационный проспект фирмы «Sperry» (США), 1956 г.
3. Информационный проспект фирмы «Anschutz» (ФРГ), 1953 г.
4. Шлейер Г.Э., Борисов В.Г. Автоматическое управление движением морских и речных судов. — М: ИПУ РАН, 1981.
5. Волк Б.Г. Автоматизация управления подводными лодками (Опыт создания автоматизированных управляющих систем многоагрегатными техническими комплексами) // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 6.
6. Прусаков В.Т. и др. Подводная лодка, устремленная в будущее // ВПК — военно-промышленный курьер. — 2006. — № 19 (135).
7. Григорьев Б.В. Корабль, опередивший время. История проектирования, создания и эксплуатации атомных подводных лодок проекта 705 (705К). — СПб.: Тайфун, 2003. — 208 с.
8. Диомидов В.Б. Автоматическое управление движением экранопланов. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1996.
9. Борисов В.Г., Данилова С.К., Чинакал В.О. Исследования по созданию перспективных систем управления морскими подвижными объектами и тренажерных систем // Настоящий выпуск. — С. 103—106.
10. А. с. 2004611323 РФ. Расчет динамических систем (РДС) / М.Х. Дорри., А.А. Рошин / Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 28 мая 2004.
11. Дорри М.Х., Рошин А.А. Инструментальная программно-алгоритмическая система для разработки исследовательских комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2008. — № 12. — С. 12—17.



Дорри Манучер Хабибуллаевич — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией автоматизации проектирования и управления многоцелевыми объектами ИПУ, действ. член Международной академии навигации и управления движением, автор более 100 публикаций по управлению ядерными энергетическими установками, морскими подвижными объектами, теории расчета динамических процессов и разработке инструментальных программных комплексов для анализа и синтеза систем управления. ☎ (495) 334-86-29, ✉ dorrmax@ipu.ru.

(Окончание. Начало см. стр. 63)

- Международная конференция «Проблемы регионального и муниципального управления»;
- Международная конференция «Управление безопасностью сложных систем»;
- Международная конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта CAD/CAM»;
- Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем»;
- Международная научно-практическая конференция «Управление инновациями»;
- Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем»;
- Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов»;
- Международный семинар им. Е.С. Пятницкого «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (STAB);
- Международный семинар-презентация и выставка по ПТК, промышленным контролерам, техническим и программным средствам АСУТП, SCADA системам, приборам и средствам автоматизации;
- Общероссийский семинар «Современные методы навигации и управления движением»;
- Российская конференция с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ).

Более подробную информацию можно найти на сайте Института <http://www.ipu.ru>.

УДК 312.1.444

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ И РАЗРАБОТКЕ ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМ

В.Г. Борисов, С.К. Данилова, В.О. Чинакал

Приведены основные результаты цикла исследований по решению теоретических, методических и практических проблем, связанных с созданием перспективных систем управления морскими подвижными объектами, повышением безопасности управления данным классом объектов и разработкой современных тренажерных систем для подготовки операторов постов управления этими объектами.

Ключевые слова: морские подвижные объекты, системы управления, компьютерные технологии, алгоритмы, имитационное моделирование, тренажерные системы.

ВВЕДЕНИЕ

Современные морские подвижные объекты (МПО), такие как подводные лодки, обитаемые и необитаемые подводные аппараты, относятся к классу технически сложных динамических объектов и обладают рядом характерных особенностей в управлении. Постоянное совершенствование тактико-технических характеристик МПО, увеличение мощности энергетических установок, скорости хода и усложнение выполняемых задач предъявляют повышенные требования к новому поколению перспективных комплексных систем управления (КСУ) техническими средствами таких объектов. Для управления применяют различные гидродинамические и гидростатические технические средства управления (ТСУ), обеспечивающие различную эффективность управления в разных режимах и имеющие определенные технические и ресурсные ограничения.

Отметим следующие основные особенности и требования к управлению МПО:

- нелинейную математическую модель движения МПО, сложные нелинейные модели работы технических средств и систем управления с общим высоким порядком полной модели (в некоторых сложных режимах более 300);
- многомерное и многосвязное управление, осуществляемое с различных постов управления;
- сложную структуру связей «объект — технические средства управления — КСУ техническими средствами — КСУ — возмущения внешней среды»;

- большое число различных режимов эксплуатации МПО (нормальные, аварийные и специальные);

- необходимость учета различных целей управления и их изменения в процессе управления в зависимости от конкретной ситуации;

- обеспечение повышенной безопасности и точности управления МПО в сложных условиях плавания;

- обеспечение высокого уровня подготовки операторов постов управления МПО и оперативной поддержки принятия ими решений;

- обеспечение координированного управления объектом в автоматическом, полуавтоматическом и дистанционном режимах;

- обеспечение альтернативного управления МПО при отказах ТСУ и возникновении аварийных ситуаций;

- дополнительные специфические требования, связанные с основным целевым назначением МПО;

- учет особенностей и возможностей построения бортовых систем управления МПО в виде распределенных автоматизированных комплексов, реализованных на современных аппаратно-программных средствах.

Разработки и исследования перспективных КСУ техническими средствами были выполнены с учетом этих требований и особенностей. Основная цель состояла в существенном повышении эффективности и безопасности управления МПО, закладываемом на этапе проектирования КСУ ТС и при создании высокоэффективных систем подготовки операторов, управляющих движением МПО. Для



реализации поставленной цели потребовалось выполнить исследования по ряду взаимосвязанных направлений.

1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ мирового и отечественного опыта создания КСУ техническими средствами и применения современных технологий позволил сконцентрировать усилия на следующих направлениях исследований.

- Разработка перспективных алгоритмов управления движением МПО на базе современных методов управления и методов искусственного интеллекта.
- Разработка компьютерной технологии создания перспективных распределенных систем управления МПО и исследование их эффективности с помощью методов полномасштабного имитационного моделирования.
- Совершенствование методов имитационного моделирования, реализующих разработанную компьютерную технологию путем создания аппаратных, алгоритмических и программных средств для построения сетевого компьютерного стенда.
- Разработка методики построения системы визуализации пространственного движения МПО и работы всех ТСУ для основных исследуемых режимов, а также отображения внешней обстановки и действующих возмущений.
- Разработка методики построения перспективных компьютерных тренажерных систем и реализации современной методики обучения операторов с помощью интеллектуальных средств поддержки принятия решений.

Выполнение исследований по этим направлениям потребовало не только применения известных методов и подходов, но и разработки новых методик и алгоритмов, а также модификации отдельных известных методов и алгоритмов в целях повышения эффективности их применения с учетом специфики управления МПО.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОСНОВНЫЕ РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

При проведении исследований в рамках указанных направлений применялись следующие методы построения управления:

- принцип максимума Л.С. Понтрягина и исследование на его основе экстремальных свойств оптимального управления МПО;
- синтез субоптимального замкнутого многосвязного управления МПО на основе исследования экстремальных свойств оптимального управления, использования эталонных моделей и предикторного управления;

- методы фильтрации и прогнозирования для оценки внешних возмущений и выявления нештатных ситуаций;

- методы математического программирования для определения альтернативных вариантов управления МПО с учетом ресурсных ограничений и при возникновении нештатных ситуаций;

- методы полномасштабного имитационного моделирования для отработки КСУ техническими средствами и обучения операторов;

- методы инженерной психологии и искусственного интеллекта в системах поддержки принятия решений в процессе управления МПО.

Были решены следующие основные задачи [1–7]:

- разработка алгоритмов программного оптимального управления движением МПО на основе принципа максимума и методов математического программирования;

- разработка субоптимальных алгоритмов координированного управления МПО с учетом полных моделей объекта, экстремальных свойств оптимального управления и основных технических и ресурсных ограничений ТСУ;

- синтез алгоритмов замкнутого управления МПО с учетом требований сложности реализации и исследование эффективности применения алгоритмов на полных имитационных моделях;

- получение сравнительных оценок эффективности применения различных алгоритмов управления движением типовых МПО в нормальных и аварийных условиях эксплуатации;

- разработка компьютерной технологии автоматизации отработки алгоритмов, отдельных подсистем управления движением МПО и автоматизации испытаний работы алгоритмического и программного обеспечения КСУ;

- разработка методики формирования и реализации полной имитационной модели движения объекта, воздействия среды и работы ТСУ с помощью объектно-событийного подхода и методов конфигурирования;

- создание аппаратно-программных комплексов (сетевых стендов имитационного моделирования) для реализации основных задач компьютерной технологии и автоматизации исследований;

- разработка системы визуализации внешней обстановки, пространственного движения МПО и работы технических средств управления (визуализация движения объекта при автоматическом, полуавтоматическом и дистанционном управлении с применением полномасштабных математических моделей движения; построение подсистемы создания виртуальной реальности (СВР) для поддержки работы КСУ и обучения операторов постов управления МПО);

- разработка методики динамического формирования сценариев работы СВР в КСУ техническими средствами и тренажерных системах при обу-



чении операторов управлению МПО в нормальных и аварийных режимах эксплуатации;

— разработка современных компьютерных систем обучения операторов и средств поддержки принятия решений, конфигурируемых для конкретных проектов.

3. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Результаты выполненных исследований позволили создать соответствующие комплексы аппаратно-программных средств, с помощью которых был разработан ряд прототипов и опытных образцов основных подсистем КСУ техническими средствами МПО и тренажерных систем для обучения операторов постов управления конкретными проектами МПО.

Фрагменты реализации на сетевом стенде имитационного моделирования разработанной компьютерной технологии, использованной при отработке алгоритмов координированного управления пространственным движением МПО в нормальных и аварийных режимах эксплуатации и при создании компьютерного тренажера для одного из проектов, приведены на рис. 1–3 (см. вклейку к с. 103) [2–7].

Рис. 1 иллюстрирует управление МПО в нештатной аварийной ситуации при затоплении четвертого отсека и управлении комплексом технических средств — горизонтальными рулями, цистернами главного балласта и изменением скорости хода МПО в режиме «совета оператору». При этом управление горизонтальными рулями и скоростью хода осуществляется автоматически, а управление балластом может быть автоматическим или дистанционным с пульта оператора. На рис. 2 приведена визуализация координированного управления пространственным движением МПО с помощью вертикальных, горизонтальных кормовых и носовых рулей, а также путем изменения скорости хода в автоматическом, полуавтоматическом и ручном режимах. На рис. 3 представлен фрагмент работы системы обучения операторов постов управления движением МПО на заданной пространственной траектории с использованием прогноза движения по траектории, работы системы визуализации и представлением зон безопасного управления при заданных ограничениях.

Показанные фрагменты приведены для иллюстрации тех больших потенциальных возможностей применения компьютерных технологий и для создания высокоэффективных КСУ техническими средствами МПО, и для построения и применения современных тренажерных систем обучения операторов постов управления МПО.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В заключение перечислим основные научные и практические результаты выполненных работ.

- Исследованы специфические особенности динамики движения МПО различных типов в условиях многорежимного и многоканального координированного управления в нормальных, аварийных и специальных режимах эксплуатации, верифицированы нелинейные модели ряда типовых объектов по результатам натурных испытаний; полученные модели использованы при отработке эффективных алгоритмов управления МПО.

- Предложена и исследована структура перспективной интегрированной распределенной системы управления движением МПО, в состав которой входят встроенные системы: имитационного моделирования, совета оператору, интеллектуальной поддержки принятия решений, СВР. Последняя из них — СВР — служит для динамического отображения пространственного поведения подводного объекта, его текущей и прогнозируемой траекторий, предельных безопасных управлений, внешней обстановки, работы ТСУ и действия различных типов возмущений на МПО в нормальных и аварийных условиях.

- Разработаны и исследованы алгоритмы координированного управления МПО с учетом взаимодействия различных постов управления МПО, возможностей реализации принципов альтернативного управления МПО, имеющихся фактических ресурсов ТСУ и эффективности их применения в реальных ситуациях.

- Разработана методика построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений, встроенных систем имитационного моделирования, виртуальной реальности и СВР для КСУ техническими средствами на базе типовых проектных решений и эффективного применения этих систем как при управлении объектом, так и при обучении операторов постов управления МПО на базе и на бортовом тренажере, встраиваемом в КСУ.

Результаты научных и методических исследований позволили выполнить по заказам ведущих научно-производственных и проектных организаций ряд НИР и ОКР по отработке перспективных алгоритмов и систем координированного управления конкретными проектами, в том числе:

- по заданию НПО «Аврора» разработан сетевой стенд имитационного моделирования для отработки алгоритмов управления для перспективных КСУ и модернизации существующих систем управления МПО (ОКР «Имитация — ИПУ»);

- разработана компьютерная технология и соответствующее программное и методическое обеспечение для ее реализации, позволяющее отрабатывать на сетевом стенде имитационного моделирования перспективные алгоритмы управления МПО;



— выполнены испытания рабочих алгоритмов координированного управления для бортовых систем управления конкретными заказами — «Ясень» и «1710» СПМБМ «Малахит», «Акула» ЦКБ «Рубин» и «Нельма», ЦКБ «Лазурит»;

— разработана система визуализации трехмерного движения МПО по проекту «Лада», демонстрировавшаяся в составе экспозиции НПО «Аврора» на международном военно-морском салоне «IMDS — 2003»;

— по заказу НИТИ им. А.П. Александрова разработан компьютерный тренажер для обучения операторов постов управления движением МПО «Ясень» в составе комплексного компьютерного тренажера управления данным заказом. Тренажер сдан в эксплуатацию.

В целом выполнение данного цикла исследований и ряда НИР и ОКР направлено на поиск путей создания нового поколения перспективных систем управления МПО, обеспечивающих существенное повышение безопасности, точности и качества управления данным классом МПО в режимах нормальной и аварийной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борисов В.Г., Данилова С. К., Чинакал В.О.* Создание и применение компьютерной технологии повышения безопасности управления морскими подвижными объектами // Проблемы управления. — 2007. — № 4. — С. 79–84.
2. *Сетевой* комплекс для разработки и исследования эффективности систем управления движением подводных объектов / В.М. Корчанов, В.Г. Борисов, С.К. Данилова, В.О. Чинакал // Тр. Междунар. конф. по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех — 2001». — СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001.
3. *Комплексная* отработка режимов координированного управления движением подводной лодки на этапе проектирования и при обучении операторов постов управления на тренажерах / В.М. Корчанов, В.Г. Борисов, С.К. Данилова, В.О. Чинакал // Тр. 4-й Междунар. конф. «NSN — 2007». — СПб.: «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова», 2007.
4. *Данилова С.К.* Один подход к определению области достижимости вектора Ψ_0 для решения задач управления по принципу максимума // Тр. 4-й Междунар. конф. по проблемам управления. — М.: ИПУ, 2009. — С. 201–206.
5. *Борисов В.Г., Данилова С.К., Чинакал В.О.* Компьютерный понятийный тренажер для обучения операторов управления подводным объектом // Тр. 4-й Междунар. морского салона «IMDS — 2003». — СПб.: ЛЕНЭКСПО, 2003.
6. *Интеллектуальная* система поддержки принятия решений для интегрированных систем управления и навигации морскими подвижными объектами / В.Г. Борисов, С.К. Данилова, В.О. Чинакал // Тр. XI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2004.
7. *Borisov V.G., Danilova S.K., Chinakal V.O.* About Building of The Integrating System of Navigation, Management and Educating the Operators with Use of Intellectual Methods of Control // 12th Saint Peterburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. — St Peterburg, 2005.



Борисов Владимир Георгиевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИПУ. Автор более 60-ти научных работ по созданию алгоритмических структур управления подвижными морскими и авиационными объектами и тренажеров для обучения операторов, ответственный исполнитель шести ОКР по заказу ведущих морских бюро. ☎(495) 334-92-40, ✉ L57_1@ipu.ru.



Данилова Светлана Кузьминична — канд. техн. наук., вед. науч. сотрудник ИПУ. Автор более 50-ти научных работ по созданию алгоритмических структур управления подвижными морскими объектами и тренажеров для обучения операторов, научный руководитель девяти ОКР по заказу ведущих морских бюро. ☎(495) 334-92-40, ✉ L57_1@ipu.ru.



Чинакал Вячеслав Олегович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИПУ. Автор более 60-ти научных работ по созданию систем управления промышленными объектами в классе непрерывных технологических процессов и по разработке алгоритмических структур управления подвижными морскими объектами и тренажеров для обучения операторов, ответственный исполнитель трех ОКР. ☎(495) 334-90-21, ✉ chinakal@ipu.rssi.ru.

CONTENTS & ABSTRACTS

SEVENTY YEARS OF NATIVE CONTROL SCIENCE
EVOLUTION AND FORMATION: INSTITUTE OF CONTROL
SCIENCES IS 70 2

RESEARCH ON AUTOMATIC CONTROL THEORY. 13

Polyak B.T.

The history of automatic control research in the Institute for Control Science from its establishment to the present day is considered. The prominent scientists of the Institute which have made a considerable contribution in development of control theory are mentioned. Modern research directions are briefly addressed.

Keywords: automatic regulation, control theory, linear systems, nonlinear systems, discrete-time systems, relay systems, optimal control, adaptive control, robustness.

EXPERT-RANGING ANALYSIS METHODOLOGY IN
COMPLEX ORGANIZED DATA PROCESSING
AND CONTROL PROBLEMS
(history of development and perspectives) 19

Dorofeyuk A.A.

The history and perspectives of development of complex organized data structure-ranging analysis methodology – a swiftly developing scientific branch both in Russia and abroad, which emerged from the statistical methods of data processing and pattern recognition methods – are examined. Both theoretical and applied results drawn in this scientific field are described.

Keywords: expert-ranging analysis; automatic classification; optimal parameters grouping; piecewise complicated dependence approximation; hierarchical and combined piecewise approximation; collective conflict-free, structural-hierarchical and correspondence expertise.

ACTIVE SYSTEMS THEORY (history of development) 29

Burkov V.N., Novikov D.A.

The development and modern state of the active systems theory – the branch of control theory, taking into consideration the human factor in essential degree, is described. The main results and scientific groups are presented.

Keywords: active system, mechanisms of staff and structure management; institutional, motivational, and informational management.

MAIN RESULTS OF INVESTIGATIONS
AND DEVELOPMENT ON TECHNICAL MEANS
AND AUTOMATION SYSTEMS 36

The article is devoted to retrospective analysis of research of Institute of Control Sciences in technical means and automation systems development area from 1939 to 2009. The scientists who made a valuable contribution to the area of focus are mentioned. The main attention is drawn to the results of the last decade. We analyze scientific and technical potential of the staff of the laboratories united in the technical means and automation systems' area.

Keywords: elements, facilities, technical means, automation, control systems, logical control, technical diagnostics, reliability.

CONTEMPORARY METHODS OF PRODUCTION
PROCESS CONTROL 56

Bahtadze N.N., Lototsky V.A.

A number of control problems at different levels of production process are presented. Identification algorithms of technological processes based on the construction of virtual models using functional ar-

chives and knowledge base are proposed. An associative search procedure for the construction of virtual models is produced.

Keywords: identification of technological processes, knowledge base, associative search models, soft sensors.

INTELLECTUALIZATION OF CONTROL DECISIONS
SUPPORT AND CREATION OF INTELLECTUAL SYSTEMS
IN THE RAS INSTITUTE OF CONTROL SCIENCES. 64

Kuznetsov O.P.

The results obtained at Institute of Control Sciences in the field of intellectualization of control systems are considered. The main attention is given to the methods of decision-making support in ill-structured situations based on cognitive maps. The linear and fuzzy cognitive models are described; analysis of problems for ill-structured situations on the basis of these models are formulated; short characteristics of methods of their solution and the program technologies developed on the basis of these methods are given.

Keywords: decision-making support, ill-structured situations, linear cognitive maps, fuzzy cognitive maps, intellectual technology.

COMPUTERIZED INFORMATION MANAGEMENT
SYSTEMS WITHIN SOCIAL-ECONOMIC
AND ORGANIZATIONAL INSTITUTIONS 73

Kulba V.V., Kosjachenko S.A., Lebedev V.N.

Retrospective analysis of theoretical and applied problems and tasks which connected with designing modular computerized management systems for social-economic and organizational institutions is presented. These problems and tasks have been elaborated in Trapeznikov Institute of Control Sciences (Russian Academy of Sciences) during the last forty years.

Keywords: analysis, synthesis, structure, modularity, real time, information management systems, data base, scenario approach, emergency situation, computerized designing.

THE CONTROL OF SPACECRAFTS AND AEROPLANES . . . 87

Rutkovsky V. Yu.

Some fundamental results that have been drawn in the Institute of Control Sciences of RAS related to the theory and control systems for spacecrafts and airplanes are presented.

Keywords: control system, liquid-propellant rocket engine, artificial earth satellite, flexible spacecraft, rocket, airplane, image processing.

AUTOMATION CONTROL OF MARINE VESSELS 94

Dorry M.Ch.

The stages of development of the automation for the ship control systems are considered. The role of the Institute of Control Sciences of RAS in solving the basic problems of automation of marine vessels has been reflected.

Keywords: automation, control systems, marine vessels.

RESEARCH AIMED AT CREATION OF PERSPECTIVE
MARITIME MOBILE VEHICLES CONTROL SYSTEMS
AND TRAINING SYSTEMS DEVELOPMENT 103

Borisov V.G., Danilova S.K., Chinakal V.O.

The basic results of research aimed at solution of the theoretical, methodical and practical problems connected with creation of perspective control systems for maritime mobile vehicles, increase of safety of control for the objects of the given class and development of modern training systems for training of operators of posts for these objects are presented.

Keywords: maritime mobile vehicles, control systems, computer technology, algorithms, simulation systems, training systems.



ПРЕМИИ СОТРУДНИКОВ ИНСТИТУТА



ЛАУРЕАТЫ ЛЕНИНСКОЙ ПРЕМИИ

Академик Цыпкин Я.З., 1960 г.
Д-р техн. наук Айзерман М.А.,
1964 г.
Берендс Т.К., 1964 г.
Канд. техн. наук
Ефремова Т.К., 1964 г.
Канд. техн. наук
Тагаевская А.А., 1964 г.
Д-р техн. наук Таль А.А., 1964 г.
Академик Петров Б.Н., 1966 г.

Академик Емельянов С.В., 1972 г.
Д-р техн. наук Уткин В.И., 1972 г.
Академик Трапезников В.А., 1981 г.
Академик Воронов А.А., 1988 г.
Академик Пугачёв В.С., 1990 г.



ЛАУРЕАТЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРЕМИИ

Академик Пугачёв В.С., 1948,
1976 гг.
Д-р техн. наук Челюстин А.Б.,
1948 г.
Академик Кулебакин В.С.,
1950 г.
Академик Трапезников В.А.,
1951, 1976 гг.
Д-р техн. наук Коган Б.Я.,
1951 г.
Д-р техн. наук
Полонников Д.Е., 1951 г.
Гуров В.В., 1951 г.
Д-р техн. наук Фельдбаум А.А.,
1951 г.
Д-р техн. наук Фицнер Л.Н.,
1951 г.
Д-р техн. наук Портнов-
Соколов Ю.П., 1967, 1983 гг.



Д-р техн. наук Рутковский В.Ю., 1970, 1981 гг.
Д-р техн. наук Попов В.И., 1970 г.
Чл.-корр. РАН Лётов А.М., 1972 г.
Академик Петров Б.Н., 1972, 1981 гг.
Чл.-корр. РАН Петров В.В., 1972 г.
Д-р техн. наук Уланов Г.М., 1972, 1983 гг.
Д-р техн. наук Солодовников В.В., 1972 г.
Д-р техн. наук Агамалов Ю.Р., 1976 г.
Д-р техн. наук Агейкин Д.И., 1976 г.
Д-р техн. наук Кнеллер В.Ю., 1976 г.
Д-р техн. наук Райбман Н.С., 1976 г.
Д-р техн. наук Чадеев В.М., 1976 г.
Исайкина Л.Ф., 1976 г.

Д-р техн. наук Шкабардня М.С., 1976 г.
Академик РАМН Викторов В.А., 1977 г.
Канд. техн. наук Лункин Б.В., 1977 г.
Мишенин В.И., 1977 г.
Академик Емельянов С.В., 1980, 1994 гг.
Д-р техн. наук Волков А.Ф., 1981 г.
Д-р техн. наук Земляков С.Д., 1981 г.
Д-р техн. наук Крутова И.Н., 1981 г.
Д-р техн. наук Павлов Б.В., 1981 г.
Академик Наумов Б.Н., 1981, 1987 гг.
Д-р техн. наук Андриенко А.Я., 1983 г.
Д-р техн. наук Иванов В.П., 1983 г.
Канд. техн. наук Поддубный А.С., 1983 г.
Канд. техн. наук Кабалевский А.Н., 1983 г.
Академик Васильев С.Н., 1984 г.
Академик Макаров И.М., 1984 г.
Чл.-корр. РАН Авен О.И., 1984 г.
Д-р техн. наук Мамиконов А.Г., 1984 г.
Д-р техн. наук Полонников Д.Е., 1984 г.
Д-р техн. наук Эпштейн В.Л., 1984 г.
Академик Кузнецов Н.А., 1985 г.
Канд. физ.-мат. наук Червоненкис А.Я., 1987 г.
Д-р техн. наук Бурков В.Н., 1989 г.
Академик Коровин С.К., 1994 г.
Д-р техн. наук Райков А.Н., 2007 г.



ЛАУРЕАТЫ ПРЕМИИ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР

Канд. техн. наук
Байковский В.М., 1960 г.
Линский М.Л., 1973 г.
Д-р техн. наук Бурков В.Н., 1981 г.
Академик Емельянов С.В., 1981 г.
Д-р техн. наук Вапник В.Н.,
1986 г.
Д-р техн. наук Прохоров Н.Л.,
1988 г.



ЛАУРЕАТЫ ПРЕМИИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

Чл.-корр. РАН Березовский Б.А.,
1978 г.
Д-р техн. наук Виноградская Т.М.,
1978 г.
Д-р соц. наук Якимец В.Н., 1978 г.
Д-р техн. наук Рубинович Е.Я.,
1980 г.
Канд. физ.-мат. наук
Серебровский А.П., 1980 г.
Канд. техн. наук Тулепбаев В.Б.,
1985 г.

Канд. техн. наук Кузьмин С.А., 1985 г.