

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 12 (117)
декабрь
2010

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

Главный редактор:
ТЕРЯЕВ Е. Д.

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

Выпускающий редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:
ПЕТРИН К. В.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В. В. СОЛОДОВНИКОВА И 80-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ Р. Э. КАЛМАНА

Филимонов Н. Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы 2

Степанов О. А. Рекуррентное оценивание и фильтрация: предыстория и современное состояние 10

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИПУСС РАН ПО УПРАВЛЕНИЮ И МОДЕЛИРОВАНИЮ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

Виттих В. А. Проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах 17

Ржевский Г. А. Теория сложных систем и мультиагентные технологии: методология для практического использования 23

Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем 33

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Самоорганизующиеся системы группового управления интеллектуальными роботами 47

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Часть II 54

Матвеев В. В., Распопов В. Я., Лихошерст В. В. Система ориентации беспилотного летательного аппарата с каналом видеонаблюдения 66

Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание параметров движения космических аппаратов по критерию максимального правдоподобия 70

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2010 г. 74

Contents 80

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

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

К 100-летию со дня рождения В. В. Солодовникова и 80-летнему юбилею Р. Э. Калмана

УДК 517.977.5; 681.5.03

Н. Б. Филимонов,

д-р техн. наук, вед. науч. сотр., проф.

ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, МГУПИ,
г. Москва,
nbfilimonov@mail.ru

Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы*

Обсуждается эволюция критериальной базы задач оптимального управления. Анализируются особенности методологии квадратичной оптимизации. Показаны ретроспектива и логика становления полиздральной оптимизационной парадигмы в задачах управления и ее связь с Солодовниковской концепцией качества процессов управления.

Ключевые слова: качество процессов управления, критерии оптимальности, квадратичная оптимизация, полиздральная оптимизация

"Усилия на ложном пути множат заблуждения"
Ф. Бэкон

"Чем настырнее охраняется
"чистота" идеи, тем скорее она гибнет.
Охранители идеи — первые ее гробовщики"
Д. Блохинцев

"Теория, зашедшая в тупик,
открывает блестящие перспективы"
Иbn Сабей

В. В. Солодовников — один из основоположников технической кибернетики

В настоящем 2010 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Владимира Викторовича Солодовникова, доктора технических наук, профессора, выдающегося советского ученого, имеющего мировую известность, крупнейшего специалиста в области автоматики и процессов управления.

После окончания в 1934 г. Ленинградского физико-механического института В. В. Солодовников работал во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина, где в 1939 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1946 по 1956 гг. он заведовал лабораторией в Институте автоматики и телемеханики (ИАТ) АН СССР (ныне Институт проблем управления РАН), где в 1948 г. защитил докторскую

* Работа выполнена в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (гранты РФФИ № 10-08-01139-а и № 10-08-01156-а)

диссертацию (научный консультант диссертации — организатор и первый директор ИАТ, академик В. С. Кулебакин, официальные оппоненты — академики Н. Н. Боголюбов и А. Ю. Ишлинский). В этом же году он основал и сорок лет бессменно возглавлял в МВТУ им. Н. Э. Баумана кафедру "Системы автоматического управления". В 1956 г. он организовал и затем до 1960 г. осуществлял научное руководство Центральным научно-исследовательским институтом комплексной автоматизации.

В. В. Солодовников является одним из основоположников технической кибернетики, основателем советской частотной научной школы в области автоматического управления. За почти 60-летний период своей научной деятельности он выполнил фундаментальные исследования по теории автоматического управления и регулирования, которые изложены в 27 монографиях и учебных пособиях, 20 из которых переведены и изданы в США, Великобритании, Франции, Германии, Польше, Болгарии и др. Его перу принадлежит первая в мировой научно-технической литературе монография, посвященная статистическому анализу и оптимизации систем автоматического управления (1952 г.), перевод которой в США осуществил "отец" теории нечетких множеств Заде (L. Zadeh).

В 1954 г. под руководством В. В. Солодовникова издан знаменитый "зеленый кирпич" — капитальный коллективный труд "Основы автоматического регулирования", объемом 1117 с., авторами которого явились элита отечественной автоматики (17 ведущих отечественных специалистов в области автоматического регулирования). Затем в 1967—1969 гг. под его редакцией вышла уникальная семитомная серия инженерных монографий "Техническая кибернетика", удостоенная Государственной премии СССР. Наконец, под его редакцией изданы 14 выпусков широко известного сборника "Автоматическое управление и вычислительная техника".

В. В. Солодовниковым подготовлено более 100 кандидатов и 19 докторов наук, многие из которых стали известными учеными, инженерами и крупными организаторами науки и техники.

Его работы внесли значительный вклад в развитие следующих ключевых направлений в области автоматического и автоматизированного управления:

- идентификация динамических систем;
- аналитические самонастраивающиеся автоматические системы;

- нестационарные системы автоматического управления;
- статистический анализ и оптимизация автоматических систем;
- автоматизация производственных процессов.

В число его основных научных достижений входят:

- ◀ концепция качества автоматических систем;
- ◀ частотные методы анализа и синтеза автоматических систем;
- ◀ методы статистической динамики автоматических систем.
- ◀ принцип сложности в теории автоматических систем.

Созданная В. В. Соловьевым научная школа успешно продолжает исследования актуальных вопросов современной теории автоматических систем.

Классическая концепция качества автоматических систем

Проблема качества автоматических систем, имея давнюю историю, далеко не исчерпала себя и продолжает оставаться одной из центральных, наиболее консервативных, "вечно юных" и слабо развивающихся проблем современной теории и практики автоматического управления.

Понятие качества автоматической системы, характеризующее ее динамические свойства с точки зрения целевого назначения, впервые было введено в автоматику В. В. Соловьевым в 1939—1941 гг. [1]. Им было предложено судить о качестве системы по виду и характеру ее переходных процессов, а количественную оценку качества системы основывать на *прямых, или первичных, показателях качества: установившейся ошибки, максимальном отклонении и длительности* — численных параметрах переходного процесса, характеризующих соответственно точность, перерегулирование и быстродействие системы. Позже, наряду с прямыми показателями качества системы, стали использовать также и *косвенные показатели качества* — частотные, корневые и интегральные показатели, приближенно характеризующие отдельные стороны динамики автоматической системы.

В. В. Соловьев впервые сформулировал задачу синтеза автоматических систем исходя из требований обеспечения *допустимого качества* в виде заданных ограничений на прямые показатели качества. Данные требования наглядно представляются так называемой "ограничивающей коробочкой", локализующей переходные характеристики системы в плоскости "время—реакция". Им был также разработан метод синтеза автоматических систем с допустимым качеством — так называемый *метод логарифмических частотных характеристик* [2], который в 1950—1970-е гг. являлся основным инженерным методом проектирования линеаризованных

автоматических систем и до сих пор пользуется большой популярностью в учебно-методической литературе по теории автоматического управления.

В работе [3] приведены результаты систематического исследования ключевых вопросов разрешимости задачи синтеза автоматической системы с допустимым качеством для класса конечномерных стационарных одноканальных и многосвязных объектов управления.

Оптимизационная парадигма качества процессов управления

Требования, предъявляемые к качеству процессов управления синтезируемой автоматической системы, определяются ее функциональным назначением. Согласно классификации А. А. Фельдбайма возможны три способа формулировки данных требований:

- ◆ в виде *допустимого качества* — требование не-превышения показателей качества заданных предельно допустимых значений (впервые предложен в работах В. В. Соловьева);
- ◆ в виде *заданного качества* — требование равенства показателей качества заданным (желаемым) значениям (идейно восходит к И. А. Вышнеградскому, впервые сформулирован В. С. Кулебакиным, а затем Уайтли (A. L. Whiteley) и Гуллемином (E. A. Guillemin));
- ◆ в виде *оптимального качества* — требование наилучших значений показателей качества (способ предложен сначала применительно к косвенным показателям качества В. С. Кулебакиным и Холлом (A. C. Hall), а затем к прямым показателям качества А. А. Фельдбаймом, Гопкиным (A. M. Hopkin), А. Я. Лернером и Бушау (D. W. Bushaw)).

Развитие автоматики всегда шло по пути совершенствования автоматических систем с учетом динамических характеристик управляемого объекта и располагаемых системотехнических ресурсов для достижения цели управления. В связи со становлением математической теории оптимизации и ее неизбежным влиянием на инженерные науки естественно возникло понимание необходимости внесения оптимизационного аспекта в постановку задач управления.

Зарождение теории оптимального управления как самостоятельного научного направления относится к началу 1950-х гг. Сначала ставились частные постановки задачи обеспечения оптимальных (в каком-либо смысле) или близких к ним характеристик процесса управления и предлагались решения, основанные, как правило, на эвристических приемах исходя из чисто интуитивных соображений. Постановка общей задачи оптимального синтеза автоматических систем впервые дана А. А. Фельдбаймом [4] на основе введенных им понятий "опти-

мальный процесс" и "оптимальная система". Здесь качество процессов управления предлагается оценивать некоторым критерием и оптимизировать процессы управления согласно этому критерию. Современные методы оптимизации процессов управления базируются на математическом аппарате и численных методах классического вариационного исчисления, принципа максимума, динамического программирования, функционального анализа и математического программирования.

В настоящее время в теории автоматических систем доминирует оптимизационная парадигма качества, суть которой выражает программный манифест Я. З. Цыпкина: "*Оптимизировать все, что оптимизируется, а что не оптимизируется, сделать оптимизируемым*". Подчеркнем смысл понятия "парадигма" — это система взглядов, методов и подходов, принятых в научном сообществе в рамках устоявшейся научной традиции в определенный период времени.

Проблема выбора критерия качества процессов управления

Важнейшим (по А. А. Красовскому — "самым важным") этапом формализации задачи оптимального управления является выбор оптимизируемого критерия качества, который, как подчеркивал А. М. Летов, "диктуется опытом, здравым смыслом и всегда носит частный характер, определяемый природой объекта управления". Выбор подходящего критерия представляет собой весьма неоднозначную и противоречивую проблему, которая, несмотря на свою актуальность, до сих пор остается открытой, может вызвать, по мнению Я. З. Цыпкина, "грустные размышления и пессимизм" и является, по мнению А. А. Красовского, "трудностью, чуть ли не обесценивающей оптимизационный подход".

Приведем лишь некоторые авторитетные мнения из более чем полувековой полемики по данной проблеме, начало которой положили Заде (L. A. Zadeh) [5] и Калман (R. E. Kalman) [6]:

"Невозможно, да и не следует, избегать строгого определения показателя качества, так как сила математического мышления проявляется полностью только в случае, когда задача четко сформулирована"

Калман

"В каждом конкретном случае выбор критерия следует производить на основании опыта. Однако если этот выбор сделан, при математическом решении задачи критерий можно рассматривать как постулат".

А. М. Летов

"Выбор функции критерия обычно требует некоторого компромисса между наиболее точной оценкой физического процесса и формулировкой, наиболее удобной для решения математической задачи".

Беллман (R. E. Bellman)

Вместе с тем, тот же Беллман достаточно аргументировало утверждал, что "для многих задач вопросы оптимальности совсем не существенны. Это просто математический инструмент, который помогает нам формализовать слово "можно".

Итак, выбор критерия качества процессов управления входит в принципиально неизбежную эвристическую "засыпку в жернова математики" и должен основываться на precedентах. При этом доверять можно лишь тем критериям, которые уже не раз оправдывали себя в практике. Как отмечал А. А. Первозванский, "критерии оптимальности, как правило, носят условный характер: инженер должен придумать тот или иной сводный показатель качества работы системы, ориентируясь как на интуитивное представление о том, "что такое хорошо, и что такое плохо", так и на известный ему набор образцовых типичных формулировок" [7, с. 582].

Линейно-квадратичная задача оптимизации процессов управления

К линейно-квадратичным задачам управления, или задачам аналитического конструирования оптимальных регуляторов (AKOP), относятся задачи структурно-параметрического синтеза линейных систем управления на основе минимизации квадратичного критерия качества. Задачи данного типа впервые были рассмотрены и решены в работах Р. Э. Калмана [8] и А. М. Летова [9].

В связи с исключительным использованием в современных автоматических системах средств вычислительной техники, практическое значение представляют лишь задачи дискретного управления. Исходя из этого ограничимся обсуждением дискретного варианта задачи AKOP.

Рассматриваемый класс динамических объектов управления описывается линейным векторным разностным уравнением состояния вида

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

где $t \in T$ — дискретное время; $T = [0: T-1] \subset \mathbb{Z}_+$ — интервал управления; $T \geq 1$ — конечный (терминальный) момент времени; $\mathbf{x} = \text{col}(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{X} = \mathbb{R}^n$ — вектор переменных состояния; $\mathbf{u} = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_r) \in \mathbb{U} = \mathbb{R}^r$ — вектор управляющих переменных; $\mathbf{A}: T \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ и $\mathbf{B}: T \rightarrow \mathbb{R}^{n \times r}$ — функциональные матрицы; \mathbb{X} — пространство состояний; \mathbb{Z}_+ — множество неотрицательных целых чисел; \mathbb{R}^i — i -мерное вещественное линейное пространство.

Оптимизируемый функционал имеет квадратичную структуру:

$$\begin{aligned} \mathcal{F} = & \mathbf{x}^T(T)\mathbf{P}(T)\mathbf{x}(T) + \\ & + \sum_{t=1}^{T-1} \mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}(t)\mathbf{x}(t) + \sum_{t=0}^{T-1} \mathbf{u}^T(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{u}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{P}(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ и $\mathbf{Q}(t) \in \mathbb{R}^{r \times r}$ — симметричные, неотрицательно либо положительно определенные функциональные матрицы весовых коэффициентов.

Таким образом, задача управления формализуется как оптимизационная задача:

$$\mathcal{F} \rightarrow \min.$$

Для решения задач АКОР развит мощный аналитический аппарат и эффективные вычислительные процедуры, основанные на методах классического вариационного исчисления, принципе максимума Понтрягина, методе динамического программирования Беллмана.

Критерий качества (2) является дискретным аналогом интегральных квадратичных критериев качества процессов управления. Следует отметить, что последние были впервые применены в области автоматического управления в работах Б. В. Раушенбаха, Н. Д. Моисеева, В. С. Кулебакина, Б. В. Булгакова, Ф. А. Михайлова, А. А. Красовского, А. А. Фельдбаума и др.

Весьма интересные модификации критерия качества (2) предложены в работах В. И. Зубова, Весткотта (D. G. Westcott), Флорентини (J. J. Florentin) и Пирсона (D. D. Pirson), а также А. А. Красовского [10].

"Безраздельное господство" методологии линейно-квадратичной оптимизации

Даны весьма разные и порой противоречивые объяснения широкого распространения квадратичных критериев качества процессов управления. Так, по мнению Я. З. Цыпкина, "безраздельное господство" данных критериев обусловлено их выбором, который произволен, субъективен и, как выразился Негоитэ (C. V. Negoita), "может вообще являться лишь делом вкуса", а по мнению А. А. Красовского — их "большой полнотой" по сравнению с частными показателями качества переходных процессов. Надо признать, что возникновению и развитию квадратичных критериев качества во многом способствовали не столько потребности инженерной автоматики, сколько попытки разработать единую теорию синтеза автоматических систем на основе достижений математической теории оптимизации. Данные попытки основаны на очевидных достоинствах методологии квадратичной оптимизации процессов управления: внешняя простота, законченность и аналитичность решения, а также применимость к широкому классу линейных стационарных и нестационарных динамических объектов как с конечным, так и с бесконечным временем функционирования. Приведем некоторые авторитетные высказывания по этому поводу:

"Введение квадратичного критерия — вопрос, прежде всего, математического удобства и часто диктуется желанием применить для решения задачи аналитические методы и получить решение в явном виде".

Р. Беллман

"Основной причиной, обуславливающей широкое применение квадратичного критерия качества, является его удобство для аналитических исследований".

Соренсон (H. W. Sorenson)

"Широкое распространение методов квадратичной оптимизации объясняется тремя причинами — линейность обратной связи, простота ее расчета и удовлетворительное качество процессов управления, — а не какой-либо возможной интерпретацией квадратичного критерия качества".

Уонэм (W. M. Wonham)

Состоятельны ли квадратичные критерии качества?

Несмотря на чрезвычайную популярность и видимые достоинства методология квадратичной оптимизации процессов управления неоднократно подвергалась резкой критике со стороны ведущих отечественных и зарубежных ученых. Так, обсуждая АКОРовский бум, Н. Н. Моисеев подчеркивал, что основные аргументы для выбора квадратичных критериев качества процессов управления "лежат вне сферы содержательного анализа", а А. А. Первозванский заметил, что при выборе критерия качества весьма распространенной является ситуация, когда "выбирается не тот показатель, который наиболее соответствует смыслу дела, а тот, который входит в условия строго доказанных математических утверждений, например, стандартный интегральный квадратичный показатель". Беллман, касаясь задачи АКОР, отмечал, что данной "менее важной задачей" часто заменяют исходную, "более реалистичную задачу" оптимизации, и подчеркивал: "Это напоминает историю об одном человеке, который, потеряв кольцо посреди улицы, искал его под фонарем, потому что там светлее", хотя оно "осталось в той непроглядной темноте, которая показалась слишком затруднительной для поисков".

Одним из первых, кто подверг критике квадратичные критерии качества, был В. В. Соловьев, который еще в 1953 г. в своем известном докладе по проблеме качества автоматических систем подчеркивал, что "между значениями квадратичных интегральных оценок и показателей качества, к сожалению, не существует определенного соответствия". Среди современных критических взглядов по этому поводу укажем на мнение А. А. Колесникова: "то обстоятельство, что в теории АКОР непосредственно не рассматриваются общепринятые в инженерной практике прямые показатели качества синтезируемых систем, ставит под сомнение "опти-

мальность" получаемых при этом решений. Это и послужило поводом для критики методов АКОР, основанных на постулировании квадратичных критериев качества" [11, с. 131]. Наконец, следует заметить, что данная точка зрения на квадратичный критерий качества содержится и у представителей "АКОРовских научных школ". Для примера процитируем В. Н. Букова: "С инженерных позиций представляется естественным построение критериев оптимальности, непосредственно учитывающих частные прямые показатели качества процесса управления. Эти показатели физически наиболее ясны и имеют четкие границы допустимых значений, основанные на богатом опыте конструирования систем. Однако более широкое распространение в методах проектирования систем управления получили косвенные показатели качества, которые, как правило, проще вычисляются и более удобны в аналитических исследованиях".

Несмотря на возможные интерпретации квадратичного критерия качества (2) он не имеет ясного физического смысла. Так, например, Беллман рассматривал его как меру потерь мощности, А. А. Красовский интерпретировал его как некую обобщенную работу, а А. М. Летов — как интегральный показатель демпфирования переходных процессов. Однако, на самом деле, по величине данного критерия невозможно судить о качестве процессов управления, поскольку для переходных процессов, сильно различающихся своими локальными свойствами (монотонность, апериодичность, колебательность и т. п.), он может принимать одно и то же значение. По-видимому, можно согласиться с трактовкой обсуждаемого критерия как интегрального "энергетического" показателя качества процесса управления, весовые матрицы которого $\mathbf{P}(t)$ и $\mathbf{Q}(t)$ определяют степень важности "энергетических затрат" по различным переменным состояния и управляющим воздействиям.

До сих пор остается открытым вопрос обоснованного выбора весовых матриц $\mathbf{P}(t)$ и $\mathbf{Q}(t)$ в функционале (2), причем в инженерной практике такой выбор фигурирует как постулат. Разумеется, постулирование — это тоже выбор, но, как заметил Рассел (B. Rassel), "метод постулирования имеет много преимуществ, совпадающих с теми, которые присущи воровству по сравнению с честным трудом". По этому поводу А. М. Летов рассуждал: "не представляет ли постулирование попытку скрыть за пленительным словом "оптимальность" практическую бесполезность предлагаемых решений? Справивается, нельзя ли сделать так, чтобы проектирование любой технической системы носило бы более регулярный характер и не зависело бы от случайностей, вносимых методом постулирования". Дело в том, что матрицы $\mathbf{P}(t)$ и $\mathbf{Q}(t)$ обычно подбираются итеративно, исходя из результатов моделирования системы управления, варьированием элементов

этих матриц. Например, анализ результатов такого моделирования показал, что увеличение $\|\mathbf{P}(T)\|$ приводит к росту усиления обратной связи системы в конечный момент времени, увеличение $\|\mathbf{P}(t)\|$ расширяет полосу пропускания системы, а увеличение $\|\mathbf{Q}(t)\|$ ведет к усилению ее инерционности.

В работах Калмана [6], Беллмана и Калабы (R. E. Kalaba) [12] впервые поставлена задача о связи между весовыми коэффициентами квадратичного критерия оптимальности и динамическими свойствами оптимизируемых процессов управления, именуемая *задачей обращения*, или *обратной задачей АКОР*. До настоящего времени предпринимаются многочисленные попытки решения этой задачи. Здесь следует выделить, прежде всего, работы отечественных ученых: А. М. Летова, А. А. Красовского, Я. Курцвейля, Ю. Б. Попова, Ю. П. Плотникова, А. Г. Александрова, В. Н. Романенко, Ч. П. Даса, Р. Т. Янушевского, В. А. Подчукаева, В. В. Григорьева, В. Д. Фурасова, Л. И. Кожинской, Н. В. Кухаренко, Г. А. Крыжановского и др. К сожалению, приходится констатировать фактическую бесплодность данных попыток, поскольку уже в ранних работах А. М. Летова дан отрицательный ответ на содержательный смысл критерия (2): показано, что *любая асимптотически устойчивая замкнутая автоматическая система (даже со сколь угодно неудовлетворительным качеством переходных процессов) является оптимальной в смысле некоторого квадратичного критерия качества*. Именно в связи с этим Уонэм подчеркнул, что метод АКОР "сам по себе не решает ни одной из фундаментальных структурных проблем общей задачи синтеза" и "его нужно рассматривать лишь как один из многих подходов к обеспечению устойчивости" [13, с. 360], а С. В. Емельянов и С. К. Коровин заметили, что "рекомендации теории АКОР "могут быть взяты только за основу и редко используются на практике" [14, с. 300].

Полиэдральные критерии качества процессов управления

Итак, приходится констатировать, что квадратичные критерии качества фактически играют лишь роль формального инструмента, позволяющего в задачах синтеза использовать достаточно простой аппарат АКОР. Данное обстоятельство существенно ограничивает их прикладную ценность. Новые возможности для теории и практики автоматических систем открывают так называемые полиэдральные критерии качества процессов управления.

В основу построения полиэдральных критериев положены такие конструкции выпуклого анализа [15], как полиэдральные функции и полиэдральные нормы.

Полиэдральная функция $f(\mathbf{x})$: $\mathbb{X} = \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ — это функция, надграфик которой

$$\text{epif} \equiv \{(\mathbf{x}, \mu) \in \mathbb{X} \times \mathbb{R} : \mu \geq f(\mathbf{x})\}$$

является выпуклым полиэдром. Важнейшим конструктивным свойством любой полиэдральной функции $f(\mathbf{x})$ является возможность ее дизъюнктивного разложения, т. е. представления в виде функции дискретного (или поточечного) максимума:

$$f(\mathbf{x}) = \bigvee_{i=1}^n \varphi_i(\mathbf{x}) = \max\{\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), \dots, \varphi_N(\mathbf{x})\}.$$

Здесь $\varphi_i(\mathbf{x})$ ($i = \overline{1, N}$) — линейные базисные функции:

$$\varphi_i(\mathbf{x}) = a_{i0} + \langle \mathbf{a}_i, \mathbf{x} \rangle, a_{i0} \in \mathbb{R}, \mathbf{a}_i \in \mathbb{X}, i = \overline{1, m},$$

где $a_{i0} = \text{const}$; \mathbf{a}_i — вектор коэффициентов.

Полиэдральная норма — это норма, являющаяся полиэдральной функцией координат. Широкое распространение находят следующие две полиэдральные нормы:

$$\|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|, \|\mathbf{x}\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i|,$$

известные как октаэдрическая и кубическая (чебышевская) нормы.

Обсудим технологию формализации полиэдральных критериев качества в задачах управления с заданным *целевым* состоянием объекта \mathbf{x}^* .

В структуре критерия качества должны быть отражены требования к динамической структуре траекторий движения управляемого объекта, а также к ресурсам (стоимости) управляющих воздействий, необходимых для реализации данного движения.

Введем величины $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$, $\Delta\mathbf{x}(t)$ и $\Delta\mathbf{u}(t)$:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^*,$$

$$\Delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t+1) - \mathbf{x}(t), \Delta\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t+1) - \mathbf{u}(t),$$

характеризующие соответственно отклонение состояния объекта от целевого состояния, фазовую скорость объекта и интенсивность управляющего воздействия в текущий момент времени. Выберем некоторые полиэдральные нормы:

$$\mathcal{H}_{\varepsilon}: \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}; \mathcal{H}_{\Delta x}: \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}; \mathcal{H}_u: \mathbb{U} \rightarrow \mathbb{R}; \mathcal{H}_{\Delta u}: \mathbb{U} \rightarrow \mathbb{R}.$$

Тогда качество процесса управления в текущий момент времени можно характеризовать показателями точности управления и затрат на управление, имеющими *полиэдральную структуру* и представляющими собой комбинацию величин $\mathcal{H}_{\varepsilon}(\boldsymbol{\varepsilon}(t))$, $\mathcal{H}_{\Delta x}(\Delta\mathbf{x}(t))$, $\mathcal{H}_u(\mathbf{u}(t))$ и $\mathcal{H}_{\Delta u}(\Delta\mathbf{u}(t))$. Приведем следующие варианты данных показателей:

- ◆ *полиэдральные показатели точности управления*:

$$\mathcal{P}(t) = \lambda_{\varepsilon}(t)\mathcal{H}_{\varepsilon}(\boldsymbol{\varepsilon}(t)) + \lambda_{\Delta x}(t)\mathcal{H}_{\Delta x}(\Delta\mathbf{x}(t));$$

$$\mathcal{P}(t) = \max\{\lambda_{\varepsilon}(t)\mathcal{H}_{\varepsilon}(\boldsymbol{\varepsilon}(t)), \lambda_{\Delta x}(t)\mathcal{H}_{\Delta x}(\Delta\mathbf{x}(t))\};$$

- ◆ *полиэдральные показатели затрат на управление*:

$$\mathcal{E}(t) = \lambda_u(t)\mathcal{H}_u(\mathbf{u}(t)) + \lambda_{\Delta u}(t)\mathcal{H}_{\Delta u}(\Delta\mathbf{u}(t));$$

$$\mathcal{E}(t) = \max\{\lambda_u(t)\mathcal{H}_u(\mathbf{u}(t)), \lambda_{\Delta u}(t)\mathcal{H}_{\Delta u}(\Delta\mathbf{u}(t))\}.$$

Здесь $\lambda_{\varepsilon}(t) \geq 0$, $\lambda_{\Delta x}(t) \geq 0$, $\lambda_u(t) \geq 0$, $\lambda_{\Delta u}(t) \geq 0$ — весовые коэффициенты, которые, в частности, могут иметь вид степенных функций: $C_v t^v$, $v \in \mathbb{Z}_+$, $C_v = \text{const}$.

Следует подчеркнуть, что полиэдральные показатели $\mathcal{P}(t)$ и $\mathcal{E}(t)$ привязаны к моменту времени t , т. е. являются *точечными показателями*.

Из введенных точностных и ресурсных показателей можно формировать различные *полиэдральные критерии качества процесса управления*, например, следующего вида:

- полиэдральный терминальный критерий (*майеровского типа*):

$$\mathcal{F}_M = \mathcal{P}(T);$$

- полиэдральные интегральные критерии (*лагранжевого типа*):

$$\mathcal{F}_L = \sum_{t=1}^T \mathcal{P}(t) + \sum_{t=0}^{T-1} \mathcal{E}(t);$$

$$\mathcal{F}_L + \max_t \{\mathcal{P}(t), t \in \mathcal{T}^+\} + \max_t \{\mathcal{E}(t), t \in \mathcal{T}\},$$

$$\mathcal{T}^+ = [1:T];$$

$$\mathcal{F}_L = \max_t (\{\mathcal{P}(t), t \in \mathcal{T}^+\} \cup \{\mathcal{E}(t), t \in \mathcal{T}\});$$

- полиэдральные смешанные критерии (*больцевского типа*):

$$\mathcal{F}_B = \mathcal{F}_M + \mathcal{F}_L.$$

Фигурирующие в данных критериях величины $\mathbf{x}(T+1)$ и $\mathbf{u}(T)$, не входящие в математическую модель объекта управления (1), формально можно определить следующим образом:

$$\mathbf{x}(T+1) = \mathbf{x}(T), \mathbf{u}(T) = \mathbf{u}(T-1).$$

Приведем общий вид двух весьма перспективных для задач оптимальной стабилизации критериев качества полиэдрального типа.

Положим, что целью управления является стабилизация равновесного состояния объекта $\mathbf{x}^* = 0$, причем требуется, чтобы при любом (возмущенном) начальном состоянии $\mathbf{x}(0) \equiv \mathbf{x}_0 \neq 0$ объект был успокоен в конечный (терминальный) момент времени $t = T$: $\mathbf{x}(T) = 0$.

Пусть $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}[t, \mathbf{x}_0]$ и $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}[t, \mathbf{x}_0]$ — текущие значения управления и состояния управляемого объекта при его движении из начального состояния \mathbf{x}_0 , а $\Delta\mathbf{u}(t)$ и $\Delta\mathbf{x}(t)$ — скорости их изменения соответственно.

В общем случае качество процесса управления должно характеризовать управляющее воздействие и соответствующую ему реакцию выхода объекта. Для оценки качества процесса стабилизации предлагаются использовать следующие (впервые введенные в работе [16]) полиэдральные функционалы

потерь, учитывающие динамическую структуру фазовых траекторий и управляющих воздействий:

$$\mathcal{F} = \sum_{t=0}^{T-1} Q(\mathbf{x}(t), \Delta\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \Delta\mathbf{u}(t)); \quad (3)$$

$$\mathcal{F} = \max_{0 \leq t \leq T-1} Q(\mathbf{x}(t), \Delta\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \Delta\mathbf{u}(t)). \quad (4)$$

Здесь $Q(\mathbf{x}, \Delta\mathbf{x}, \mathbf{u}, \Delta\mathbf{u})$ — полиэдральный показатель потерь вида

$$Q(\mathbf{x}, \Delta\mathbf{x}, \mathbf{u}, \Delta\mathbf{u}) = \lambda_1(t)q_1(\mathbf{x}(t)) + \lambda_2(t)q_2(\Delta\mathbf{x}(t)) + \lambda_3(t)q_3(\mathbf{u}(t)) + \lambda_4(t)q_4(\Delta\mathbf{u}(t)),$$

где $q_1: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $q_2: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $q_3: \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$ и $q_4: \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$ — некоторые положительно однородные полиэдральные функции, а $\lambda_i(t) \geq 0$ — весовые коэффициенты, причем

$$\lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t) + \lambda_4(t) > 0, \quad t = \overline{0, T-1}.$$

В частности, можно положить:

$$q_1(\mathbf{x}) = |x_1| + |x_2| + \dots + |x_n|, \quad q_2(\Delta\mathbf{x}) \equiv 0,$$

$$q_3(\mathbf{u}) = |u_1| + |u_2| + \dots + |u_r|, \quad q_4(\Delta\mathbf{u}) \equiv 0,$$

$$\lambda_1(t) = t^\nu, \quad \nu \in \mathbb{Z}_+, \quad \lambda_3(t) \equiv 1.$$

Следует отметить, что полиэдральные критерии качества (3) и (4) представляют собой альтернативу известным квадратичным критериям качества и являются обобщением так называемых степенных критериев качества, введенных для дискретных процессов управления в работах Ю. Г. Бандароса и В. К. Шабловского и получивших развитие в работах А. А. Красовского, Б. М. Миркина, В. А. Шишлякова, М. Х. Гандельмана, Г. И. Ванюрихина и В. М. Иванова (см., например, [10]).

Остановимся на одном классическом критерии качества процессов стабилизации полиэдрального типа. Пусть стабилизируется целевое состояние объекта $\mathbf{x}^* = 0$. За меру возмущения равновесного состояния объекта примем полиэдральный показатель:

$$\mathcal{P}(t) = \mathcal{H}_x(\mathbf{x}(t)) = \|\mathbf{x}(t)\|_\infty = \max_{i \in [1:n]} |x_i(t)|.$$

Тогда критерием качества процесса стабилизации служит наибольшее значение данного показателя на интервале функционирования системы:

$$\begin{aligned} \mathcal{F} &= \max_t \{\mathcal{P}(t)\} = \max_{0 \leq t \leq T-1} \|\mathbf{x}(t)\|_\infty = \\ &= \max_{0 \leq t \leq T-1} \max_{i \in [1:n]} |x_i(t)|. \end{aligned} \quad (5)$$

Критерий (5) имеет смысл *максимальной динамической ошибки* (т. е. максимальной амплитуды всей совокупности переменных состояния) системы стабилизации и именуется в литературе *критерием равномерного приближения, максимального уклонения или критерием Чебышева*.

В особо ответственных задачах стабилизации, где требуется гарантия, что переменные состояния не превысят заданных пределов, данный критерий является наиболее объективной характеристикой качества процессов управления [17, с. 21]. Это относится, прежде всего, к переменным состояния, "пиковые" отклонения которых от допустимых пределов в течение достаточно малого отрезка времени необходимо максимальным образом уменьшать ("срезать") для обеспечения заданных требований качества и безопасности управляемого процесса. Так, например, в системах управления движением при вполне приемлемой среднеквадратичной ошибке даже единичный большой выброс мгновенной ошибки может привести к катастрофическим последствиям. Как заметил А. А. Первозванский, "для ряда практических задач более естественной, а иногда и единственной возможной является оценка эффективности системы управления по максимальному возможному на рабочем отрезке времени отклонению" [7, с. 113].

Нетрудно убедиться, что чебышевский критерий (5) является частным случаем полиэдрального критерия (3) при следующем выборе полиэдральной функции $Q(\mathbf{x}, \Delta\mathbf{x}, \mathbf{u}, \Delta\mathbf{u})$:

$$Q(\mathbf{x}(t), \Delta\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \Delta\mathbf{u}(t)) = \max_{i \in [1:n]} |x_i(t)|,$$

так что

$$\begin{aligned} q_1(\mathbf{x}) &= \max_{i \in [1:n]} |x_i(t)|, \quad q_2(\Delta\mathbf{x}) = q_3(\mathbf{u}) = q_4(\Delta\mathbf{u}) \equiv 0, \\ \lambda_1(t) &\equiv 1. \end{aligned}$$

Другим весьма распространенным критерием качества процессов управления полиэдрального типа является так называемый критерий "сумма модулей":

$$\mathcal{F} = \max_{0 \leq t \leq T-1} \sum_{i=0}^n |x_i(t)|. \quad (6)$$

Данный критерий является частным случаем полиэдрального критерия (5), если положить:

$$Q(\mathbf{x}(t), \Delta\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \Delta\mathbf{u}(t)) = \sum_{i=0}^n |x_i(t)|,$$

т. е. при

$$q_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n |x_i(t)|, \quad q_2(\Delta\mathbf{x}) = q_3(\mathbf{u}) = q_4(\Delta\mathbf{u}) \equiv 0, \quad \lambda_1(t) \equiv 1.$$

В принципе, оба полиэдральных критерия (5) и (6) могут быть использованы в задачах оптимизации процессов управления. Различие между ними обусловлено различием между октаэдрической и кубической полиэдральными нормами $\|\mathbf{x}\|_1$ и $\|\mathbf{x}\|_\infty$.

Ретроспектива полиэдральных критериев качества

Идея оценивания управляемого движения системы посредством критерия качества типа (5) восходит к оригинальным исследованиям П. Л. Чебышева, который в 1854 г. использовал его для решения кинематических задач, связанных с управлением шатуном паровой машины Дж. Уатта. В конце 30-х — начале 40-х гг. прошлого столетия данный критерий был предложен Б. В. Булгаковым для постановки и решения широко известной задачи о накоплении возмущений в линейной системе, предвосхитившей появление первых оптимизационных постановок задач управления. В автоматике данный критерий был выдвинут в 1953 г. на Втором Всесоюзном совещании по теории автоматического регулирования в качестве универсального показателя качества (динамической точности) систем стабилизации независимо В. В. Соловьевым ("критерий максимального перерегулирования") [18] и А. А. Фельдбаумом ("критерий максимального отклонения") [19], отметившим, что часто "наибольшее значение имеет не быстродействие, а именно достижение минимума максимального значения погрешности", т. е. "задача обеспечения минимакса". А. А. Фельдбаум показал, что в некоторых частных случаях системы, оптимальные по быстродействию и по минимаксу, одинаковы, т. е. процесс, оптимальный по быстродействию, является наилучшим и в смысле минимакса. Кроме того, в ряде работ показано, что минимизация критерия (5) в силу равенства

$$\max_{0 \leq t \leq T-1} |x_i(t)| = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\sum_{t=0}^{T-1} |x_i|^p \right)^{1/p}$$

обеспечивает минимизацию также и широко используемых в литературе разнообразных критериев качества интегрального и степенного типов.

Впервые применение чебышевского критерия качества (5) к задачам оптимального управления было рассмотрено в 1956 г. в известной работе Беллмана, Гликсберга (I. Glicksberg) и Гросса (O. Gross) [20]. Впоследствии особую важность его для прикладных задач управления неоднократно подчеркивали ведущие зарубежные и отечественные ученые: Дрейфус (S. E. Dreyfus), Нейштадт (L. W. Neustad), Джонсон (C. D. Johnson), Далех (M. A. Dahleh), Пирсон (J. B. Pearson), Куликовский (R. Kulikowski), Порттер (W. A. Porter), Варга (J. Warga), Е. А. Барбашин, Н. Н. Красовский, А. Б. Куржанский, Ю. С. Осипов, Н. Н. Моисеев, Ф. Л. Черноусько, Я. З. Цыпкин, В. А. Якубович, А. Я. Дубовицкий, А. А. Милютин, В. Ф. Демьянов, К. А. Лурье, Р. П. Федоренко, Р. Габасов, Ф. М. Кириллова, В. А. Троицкий, А. Г. Ченцов, В. М. Кейн, В. А. Бесекерский, А. А. Колесников, А. А. Первон-

зянский, В. П. Куропаткин, А. Е. Барабанов, О. Н. Граничин и др.

Несмотря на ясный физический смысл, практическую значимость и давнюю историю, чебышевский критерий качества так и не получил широкого применения в автоматике из-за отсутствия конструктивных методов решения порождаемых им оптимизационных задач. Некоторые попытки развития данного критерия качества были предприняты в 1960-е гг. в работах А. А. Первозванского и связанны с равномерной оптимизацией систем управления (см., например, [21]). Будучи последовательным сторонником чебышевского критерия качества, он подчеркивал: "Значение такого критерия вряд ли оспоримо, однако в практических расчетах он почти не используется. Это обстоятельство связано, в первую очередь, с неразработанностью соответствующих аналитических и вычислительных приемов"; "задачи такого рода являются наиболее сложными в вычислительном отношении" [7, с. 478]. В результате данный критерий оказался в забвении и был надолго вытеснен квадратичными критериями качества. Так, в настоящее время чебышевский критерий упоминается лишь в двух учебных пособиях [22, с. 428; 7, с. 475] и двух недавно вышедших учебниках [23, с. 117; 24, с. 143], а также в машиностроительной энциклопедии по теории автоматического управления [17, с. 21].

Реальные перспективы для широкого применения в теории и практике автоматических систем критерия качества чебышевского типа открывает полиэдральная методология (см., например, [25]). Дело в том, что применение полиэдральных критериев качества приводит к новому классу оптимизационных задач — задачам полиэдрального программирования, алгоритмизация которых основана на мощном аппарате и вычислительных методах линейного программирования.

Полиэдральная методология формализации задач управления базируется на широком спектре критериев качества полиэдральной структуры, а также полиэдральных фазовых и ресурсных ограничениях на процессы управления. На ее основе удается решить ряд ключевых задач анализа и синтеза систем управления в условиях неопределенности, в штатных, конфликтных и критических ситуациях с учетом фазовых и ресурсных ограничений.

Список литературы

1. Соловьев В. В. Об уравнении регулирования и об основной задаче теории регулирования // Бюллетень ВЭИ. 1941. № 4. С. 37—41.
2. Соловьев В. В. Синтез корректирующих устройств систем автоматического регулирования // Техническая кибернетика. ТАР. Кн. 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования, гл. VIII. М.: Машиностроение, 1967. С. 303—346.

3. Соловьев В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987.
4. Фельдбаум А. А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1953. № 6. С. 712–728.
5. Zadeh L. A. What is Optimal? // IRE Trans. on Information Theory. 1958. V. 4. № 1.
6. Калман Р. Э. Когда линейная система управления является оптимальной? // Труды Америк. об-ва инж.-механиков. Т. 86, Сер. D. 1964. № 1. С. 69–84.
7. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986.
8. Kalman R. E. Contributions to the Theory of Optimal Control // Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana. 1960. V. 5. № 1. P. 102–119.
9. Летов А. М. Аналитическое конструирование регуляторов. I, II, III // Автоматика и телемеханика. 1960. № 4. С. 406–411; № 5. С. 561–568; № 6. С. 661–665.
10. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
11. Современная прикладная теория управления. В 3-х ч. / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000: Ч. I. Оптимизационный подход в теории управления.
12. Белман Р., Калаба Р. Обратная задача программирования в автоматическом управлении // Механика: Сб. перев. иностр. статей. 1964. Т. 88. № 6. С. 3.
13. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления: Геометрический подход. М.: Наука, 1980.
14. Емельянов С. В., Коровин С. К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. М.: Наука. Физматлит, 1997.
15. Рокафеллар Р. Выпуклый анализ. М.: Мир, 1973.
16. Филимонов Н. Б. Оптимизация дискретных процессов управления по полиздральным критериям качества // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2000. № 1. С. 20–38.
17. Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. Т. 1–4. Автоматическое управление. Теория / Е. А. Федосов, А. А. Красовский, Е. П. Попов и др. Под общ. ред. Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000.
18. Соловьев В. В. Проблемы качества и динамической точности в теории автоматического регулирования // Тр. Второго Всесоюз. совещ. по ТАР. Т. II. Проблема качества и динамической точности в ТАР. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 7–37.
19. Фельдбаум А. А. К вопросу о синтезе оптимальных систем автоматического регулирования // Там же. С. 325–360.
20. Bellman R. E., Glicksburg I., Gross O. Some Nonclassical Problems in the Calculus of Variations // Proc. Amer. Math. Soc. 1956. V. 7. N 1. Feb.
21. Первозванский А. А. Критерий равномерного приближения в задачах оптимального управления // Оптимальные системы. Статистические методы: Тр. III Всесоюз. совещ. по автоматическому управлению. М.: Наука. 1968. С. 112–120.
22. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977.
23. Шавров А. В., Коломиц А. П. Автоматика. М.: Колос, 1999.
24. Теория автоматического управления / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др. Под ред. В. Б. Яковleva. М.: Высш. школа, 2003.
25. Филимонов Н. Б. Методы полиздрального программирования в дискретных задачах управления и наблюдения // Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5 т. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. Гл. 7. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. С. 647–720.

УДК 517.977.5; 681.5.03

О. А. Степанов, д-р техн., наук, проф., нач. отдела,
ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор",
г. Санкт-Петербург,
ostepanov@eprib.ru

Рекуррентное оценивание и фильтрация: предыстория и современное состояние*

Кратко излагаются предпосылки получения рекуррентного оптимального алгоритма оценивания, названного впоследствии в честь его создателя фильтром Калмана. Анализируются некоторые тенденции развития современных прикладных методов решения задач фильтрации. Приводятся основные биографические данные о Р. Э. Калмане. Обсуждаются его творческие связи с российскими учеными.

Ключевые слова: фильтр Калмана, история создания, фильтрация, оценивание, алгоритмы, Р. Э. Калман, российские ученые

Введение

В этом году отмечается восьмидесятилетний юбилей одного из основателей современной теории управления Рудольфа Эмиля Калмана. Вклад Р. Калмана в теорию управления широко известен

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00904-а.

и описан в многочисленных публикациях и изданиях. Так, уже к шестидесятилетнему юбилею Р. Калмана в 1990 г. был выпущен специальный сборник "Математическая теория систем. Влияние Р. Калмана" [1]. В него вошли работы ведущих ученых, описывающих вклад Р. Калмана в различные области теории систем, управления и фильтрации. В 2001 г. под общей редакцией Т. Базара вышло специальное издание "Двадцать пять основополагающих статей в управлении (1932–1982)" [2]. Этот объемный труд был подготовлен по инициативе "Общества по управлению" Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) в целях определения наиболее значимых результатов, полученных в весьма важный период развития теории управления. В редакционную комиссию этого сборника вошли более десятка крупнейших ученых из разных стран, в частности П. Кокотович, Л. Льюинг, Б. Андерсон, Х. Квакернак, А. Исидори, К. Острем. В сборник были включены статьи Х. Найквиста, Н. Винера, Л. С. Понtryagina, В. А. Якубовича и ряда других известных ученых. Р. Калман оказался единственным, у кого для этого издания было отобрано три статьи, при этом две из них были написаны в возрасте 30 лет [3–5].

Р. Калман неоднократно бывал в России, знаком со многими нашими известными учеными. Здесь

высоко оценивают его достижения. Наиболее важные статьи и книги Р. Калмана оперативно переводились на русский язык и хорошо известны специалистам [6–10]. В связи с 80-летием Р. Калмана в апреле этого года в Институте проблем управления Российской академии наук (РАН) при активном участии и поддержке международной общественной организации "Академия навигации и управление движением" (АНУД) был проведен специальный семинар, посвященный юбиляру [12, 13]. На очередном общем собрании АНУД 2 июня 2010 г. автором этой заметки был представлен доклад, также посвященный юбилею известного ученого. В докладе были затронуты два вопроса. Один из них касался некоторых предпосылок и последствий получения одного из наиболее важных результатов Р. Калмана, связанного с созданием рекуррентной оптимальной процедуры оценивания, получившей впоследствии наименование "фильтр Калмана". Второй относился к творческим контактам Р. Калмана с учеными нашей страны. Данная статья подготовлена по материалам доклада на общем собрании АНУД.

О Р. Калмане

Р. Калман родился 19 мая 1930 года в Будапеште [1, 14–16]. Во время войны в 1943 г. вместе с родителями эмигрировал в США. Получил степень бакалавра и магистра в Массачусетском технологическом институте. Докторскую степень защитил под руководством Дж. Рагаззини в 1957 г. в Колумбийском университете. С 1957 по 1958 г. работал штатным инженером в исследовательской лаборатории известной фирмы IBM, а с 1958 г. — в Исследовательском институте перспективных разработок (Research Institute for Advance Study-RIAS) в Балтийском порту. Здесь Р. Калман прошел путь от математика-исследователя до заместителя директора по научной работе. Именно в этот период (1958–1964) им были выполнены фундаментальные работы в области теории управления. В 1964 г. он переходит в Стенфордский университет на отделение "Электротехника, механика и исследование операций". В 1971 г. становится директором Математического центра системного анализа и профессором университета Флориды. С 1973 г. Р. Калман работает в Швейцарском федеральном институте технологий в Цюрихе.

Р. Калман — лауреат многих престижных премий и наград, таких как IEEE Medal of Honor (1974 г.), IEEE Centennial Medal (1984 г.), премия Kyoto Prize (1985 г.) (японский аналог Нобелевской премии в области новых технологий), Steel Prize (Премия Беллмана, 1997), премия и памятная медаль им. Чарльза Старка Дрейпера за разработку и внедрение "оптимальной дискретной техники (известной как фильтр Калмана), широко используемой при решении различного рода прикладных задач".

И наконец последняя — это ежегодная Национальная медаль США в области науки, которая была присуждена в 2008 г. и вручена Р. Калману 7 октября 2009 г. в Белом доме президентом США Бараком Обамой.

Р. Калман является членом Американской национальной академии наук, Американской национальной инженерной академии, Американской академии искусств и наук, иностранным членом Венгерской и Французской академий, а с 1994 г. — иностранным членом Российской академии наук по отделению проблем машиностроения, механики и процессов управления. Он также почетный доктор университетов многих стран мира.

Предыстория

Существует достаточно обширная литература, в которой обсуждаются исторические аспекты развития и становления теории фильтрации [14, 17–26]. Среди зарубежных работ, несомненно, следует выделить обзор известного ученого в области фильтрации Т. Кайлата [19]. Он включает 390 наименований, причем в отличие от некоторых работ, издаваемых за рубежом, достаточно объективно отражает вклад в теорию фильтрации не только зарубежных, но и отечественных ученых. Следует также отметить обзорные работы крупного российского (советского) ученого В. И. Тихонова, широко известного своими результатами в области оптимального оценивания [24–26].

Кратко отразим те основные вехи, которые непосредственно связаны с появлением первой работы Калмана, посвященной его знаменитому фильтру.

В качестве предшественников Калмана в разработке теории оценивания, в первую очередь, следует отметить создателей метода наименьших квадратов (МНК) — немецкого математика, астронома, геодезиста и физика Карла Фридриха Гаусса (1777–1855) и французского математика Адриена Мари Лежандра (1752–1833). Гауссу было 18 лет (1795), когда он впервые использовал, но не опубликовал метод наименьших квадратов. Лежандр независимо изобрел этот же метод и в 1806 г. опубликовал полученные им результаты [17–19]. Оба ученых рассматривали задачу оценивания постоянного вектора неизвестных параметров (ближкая постановка сформулирована, например, в [59, с. 116]). Любопытно, что первоначально Гаусс рассматривал проблему оценивания с вероятностной точки зрения. Он полагал, что ошибки независимы и совместная функция распределения вероятности остатков измерений равна произведению соответствующих функций каждого из остатков, закон распределения которых, в свою очередь, полагался нормальным. Хотя Гаусс и понимал в какой-то степени ущербность этого закона, предполагающего возможность появления бесконечно больших по уров-

нию ошибок измерения, данная им вероятностная трактовка МНК в значительной степени заложила основы для появления и обоснования метода максимума функции правдоподобии [59, с. 188]), предложенного впоследствии Р. А. Фишером (1912). Важно подчеркнуть, что в дальнейшем сам Гаусс отдавал предпочтение обоснованию МНК с детерминированных позиций — минимизации функции, характеризующей степень отклонения между вычисленными и измеренными значениями [59, с. 135].

Говоря о предшественниках Р. Калмана, необходимо вспомнить еще двух ученых — Андрея Николаевича Колмогорова (1903—1986), выдающегося советского математика, основоположника современной теории вероятностей, и крупнейшего американского математика Норберта Винера (1894—1964), чье имя обычно связывают с зарождением кибернетики.

Если Гаусс и Лежандр в начале XVIII века рассматривали задачу оценивания неизменного во времени вектора, то Колмогоров и Винер решали уже задачу оценивания изменяющихся параметров. При этом Колмогоров занимался задачей оценивания стационарной гауссовой случайной последовательности по ее измерениям на фоне ошибок измерения, которые также предполагались значениями гауссовой стационарной последовательности (см., например, [59, с. 140]). Считая, что известны корреляционные функции для оцениваемой последовательности и ошибок измерения, Колмогоров, не обсуждая сам алгоритм оценивания, получил выражения для дисперсий ошибок оптимальных в среднеквадратическом смысле оценок. Сначала он опубликовал эти результаты без доказательства в 1939 г., а потом привел уже более подробные результаты в 1941 г. [28, 29]. Работы Винера в этой области проводились в рамках военного заказа и в открытой печати были представлены в виде книги лишь в 1949 г. [30]. Винер рассматривал задачу для непрерывного времени, и им был получен алгоритм нахождения оценки в виде свертки реализации измерений с весовой функцией, которая удовлетворяла интегральному уравнению Винера—Хопфа. Задача первоначально рассматривалась для установившегося режима на бесконечном времени, и решение для нее было получено на основе факторизации спектральных плотностей. Заметим, что третья глава из этой книги под названием "The linear filter for a single time series" также впоследствии была отобрана как статья в сборник [2].

Что же не устраивало Р. Калмана в постановке задачи и полученному ранее решению? Он был не вполне согласен с предположением о том, что статистические характеристики, подобные корреляционной функции, являются верным способом описания неопределенностей, а также с тем, что описание системы с помощью передаточной функции есть в точности то же самое, что и представление

самой системы [10]. Кроме того, предложенные алгоритмы были не вполне удобны при решении прикладных задач, в том числе с использованием получающих широкое применение вычислительных машин. Существенным ограничением являлось используемое предположение о стационарном характере процессов и то, что решение было получено для бесконечного интервала времени.

Рождение фильтра Калмана

Первый публичный доклад с изложением идеи решения задачи винеровской фильтрации с помощью алгоритма, получившего впоследствии название "фильтр Калмана" (ФК), состоялся 1 апреля 1959 г. в Кливленде [10], а первая работа "A new approach to linear filtering and prediction problems" была опубликована в 1960 г. в *Transactions of the ASME* (American Society of Mechanical Engineers — Американское общество инженеров-механиков) [3]. Следует заметить, что статья появилась не в традиционном для рассматриваемой в ней задачи журнале, издаваемом Американским обществом инженеров-электриков, а в журнале Общества инженеров-механиков. Дело в том, что в то время сообщество инженеров-электриков достаточно скептически воспринимало изложенные в ней идеи, и вопрос о публикации мог значительно затянуться. Этим, кстати сказать, объясняется и содержание одного из примечаний, сделанных редакцией. В нем отмечалось, что результаты и выводы, полученные в публикуемой работе, являются личным результатом автора, и ASME ответственность за них не несет. А это была именно та работа, в которой впервые предложен алгоритм решения задачи оценивания с использованием пространства состояния [59, с. 348]. Особенность первой работы заключалась, в частности, в том, что рассматривалась задача оценивания одной последовательности на фоне другой при отсутствии составляющей ошибки в виде белого шума. При доказательстве полученных результатов была использована известная в основном лишь математикам теорема об ортогональной проекции [59, с. 210].

И хотя в статье традиционно предполагался гауссовский характер оцениваемых последовательностей, из представленных в ней результатов вытекало, что предложенный алгоритм, оптимальный при гауссовском характере ошибок измерения и возмущающих шумов, сохраняет свою оптимальность и при произвольном их распределении в классе линейных систем. В этой же статье была также доказана теорема дуальности, или двойственности, устанавливающая связь задач фильтрации и управления.

Прежде чем коротко обсудить последствия появления первой работы, заметим, что самим Р. Калманом было сделано еще одно примечание, которое относилось к той части статьи, где говорилось

о линейном характере используемых алгоритмов. Он писал: "Конечно, в общем случае эти задачи могут быть решены с помощью нелинейных фильтров. Однако к настоящему времени немного или почти ничего не известно о том, как получить (теоретически и практически) эти нелинейные фильтры" [3]. В связи с этим следует вспомнить Руслана Леонтьевича Стратоновича (1930—1997), который, в сущности, к этому времени уже решил проблему оптимальной нелинейной фильтрации, базируясь на созданной им теории условных марковских процессов.

Р. Л. Стратонович родился 31 мая 1930 г. в Москве, и ему так же, как и Р. Калману, в мае исполнилось бы 80 лет. Он экстерном закончил школу и получил золотую медаль. В 1947 г. поступил на физический факультет Московского государственного университета, где и проработал впоследствии профессором всю жизнь [31, 32].

Р. Стратонович создал стохастическое исчисление, которое является альтернативой к теории интеграла Ито и удобно для применения при описании физических проблем, ввел стохастический интеграл Стратоновича. В части решения задач фильтрации он получил уравнения в частных производных для апостериорной плотности, которая и необходима для вычисления оптимальной оценки. В дискретном случае их аналогом являются рекуррентные соотношения для апостериорной плотности [59, с. 379].

Линейный фильтр Калмана может быть достаточно просто получен с использованием этих соотношений для частного случая, соответствующего линейной гауссовой задаче [34—36].

Развитие прикладных алгоритмов фильтрации

После опубликования первой статьи Р. Калмана теория фильтрации на основе пространства состояний и вытекающие из нее методы получили бурное развитие. Р. Калман нашел благодатную почву для применения своего алгоритма в Научно-исследовательском центре Эймса, входящем в состав НАСА, а также в Лаборатории Ч. Дрейпера [14, 20, 21]. Во время своего визита осенью 1960 г. он встретился с сотрудником центра в Эймсе С. Ф. Шмидтом, который сразу же оценил потенциальные возможности нового метода применительно к проекту "Аполло", связанному с полетом на Луну. С. Ф. Шмидт был одним из первых, кто использовал фильтр Калмана при решении практических задач. В середине 60-х годов благодаря усилиям С. Ф. Шмидта фильтр Калмана стал частью навигационной системы для транспортного самолета C5A и использовался в задаче комплексной обработки данных от инерциальной системы и радиолокатора, дополнительно решая задачу отбраковки измерений с большими ошибками [14].

Р. Бьюси, который также работал в то время в RIAS, предложил Р. Калману установить связь уравнения Винера—Хопфа с уравнением Рикката в фильтре Калмана для непрерывного времени. Это и было сделано в их совместной работе [7]. Кстати, как отмечается в [14], работа, посвященная фильтру Калмана—Бьюси для непрерывного времени, была первоначально отклонена по причине якобы имеющейся, но потом не подтвердившейся ошибки в доказательстве, найденной одним из рецензентов.

При использовании фильтра Калмана при решении прикладных задач сразу же возникло множество проблем, связанных с выбором моделей, адекватно описывающих поведение ошибок измерительных систем; с чувствительностью алгоритмов к выбираемым моделям; со снижением объема вычислений при разработке субоптимальных алгоритмов фильтрации за счет сокращения размерности самого оцениваемого вектора состояния, упрощенного описания моделей ошибок измерений и порождающих шумов; с вычислительной устойчивостью предлагаемых процедур и т. д.

Развитию идей Р. Калмана и решению этих проблем были посвящены многочисленные публикации. Большое внимание уделялось различным модификациям фильтров Калмана, адаптивным алгоритмам, решению нелинейных задач [1, 17—26, 37—39]. Затем были предложены так называемые итерационные фильтры [59, с. 392], а также фильтры более высокого порядка, которые представляли собой различные модификации алгоритмов калмановского типа [14, 37, 38].

Для решения нелинейных задач с существенными нелинейностями активно разрабатывались алгоритмы, основанные на использовании уже упомянутых рекуррентных соотношений для апостериорной плотности. Здесь получили развитие такие алгоритмы, как метод точечных масс; метод, основанный на полигауссовой аппроксимации апостериорной плотности; метод разделения; метод Монте-Карло и ряд других [18, 40—44].

До середины семидесятых годов теория фильтрации и ее приложения бурно развивались. В развитие теоретических основ фильтрации помимо Р. Л. Стратоновича значительный вклад также внесли российские ученые Р. Ш. Липцер, А. Н. Ширяев, В. С. Пугачев, В. И. Тихонов, Н. К. Кульман, В. Н. Фомин, А. Б. Куржанский, М. С. Ярлыков и др. [12, 33, 45—48].

В целом можно указать два основных приложения, в которых алгоритмы фильтрации получили наибольшее применение. Одно из них связано с разработкой радиотехнических, в том числе и радионавигационных систем. Особенность заключалась в том, что здесь рассматривались в основном задачи для непрерывного времени. В СССР и в дальнейшем в России значительный вклад в разработку ал-

алгоритмов решения задач фильтрации в этой области внесли также Ю. Г. Сосулин, М. А. Миронов, В. Н. Харисов, Б. И. Шахтарин, А. К. Розов, А. И. Петров [24–27, 33, 49].

Другое приложение связано с навигацией, наведением и траекторным слежением. Здесь наряду с задачами в непрерывном времени почти сразу стали рассматриваться их дискретные варианты. Заметим, что в сборнике, посвященном 60-летию Калмана [1], именно навигационные задачи рассматривались в разделе, касающемся приложений [50]. В нашей стране это направление активно развивали А. А. Красовский, И. А. Богуславский, И. Н. Белоглазов, С. С. Ривкин, И. Б. Челпанов, Н. Т. Кузовков, О. С. Салычев, С. П. Дмитриев, Р. И. Ивановский [52–58] и многие другие.

К началу 80-х годов появился некий спад интереса к разработке алгоритмов фильтрации. Дальнейший толчок в их развитии наблюдается уже в 90-е годы. Это связано с потребностями в решении более сложных задач навигации применительно к подвижным объектам нетрадиционного типа, включая роботы, автомобили, различного рода автономные подвижные объекты, а также с существенным прогрессом в развитии вычислительных средств. В настоящее время в разработках новых алгоритмов фильтрации можно выделить два основных направления [60].

Одно из них связано с алгоритмами калмановской структуры, такими как регрессионные фильтры, сигма-пойнт-фильтры, так называемые UKF-фильтры (Unscented Kalman Filter) [61–64]. Все они основаны на достаточно простой идеи замены процедуры вычисления производных при получении линейного представления на процедуры, близкие к процедуре статистической линеаризации. Идеологически эти алгоритмы вытекают из задачи построения линейных оптимальных алгоритмов для нелинейных, негауссовских систем [59, с. 216]. Заметим, что решение задачи получения линейного оптимального алгоритма в линейной задаче для негауссова случая сводится в обычному фильтру Калмана, и в сущности об этом и говорится в работе [3]. Но в нелинейной задаче при реализации такого типа алгоритмов требуется численное нахождение интегралов, определяющих вторые моменты для измерений и взаимные моменты для измерений и оцениваемой последовательности. При оценивании случайных процессов рекуррентно такую процедуру можно получить только путем замены описания апостериорной плотности на каждом шаге с помощью двух моментов, т. е. на основе гауссовой аппроксимации апостериорной плотности. Различные модификации сводятся к различным способам упрощения вычисления интегралов, которые требуется отыскивать при нахождении линейного представления. Справедливости ради необходимо заметить, что процедура статистической линеари-

зации предлагалась и ранее. В частности, она описана в книге [38], в которой цитируются первые работы, связанные с разработкой такого приема. Однако в то время не учитывался факт наличия дополнительной ошибки при замене нелинейной функции ее линейным аналогом.

Другое направление также связано с разработкой алгоритмов нелинейной фильтрации. Задача вычисления оценки и соответствующей ей матрицы ковариаций для дискретного времени — это по сути задача вычисления многократных интегралов при использовании рекуррентного соотношения для апостериорной плотности [43, 44, 59, с. 377].

В связи с этим мощное развитие получили алгоритмы, основанные на последовательных методах Монте-Карло (Sequential Monte-Carlo) [65, 66]. Следует заметить, что первые основополагающие работы в этом направлении были опубликованы еще в середине восьмидесятых годов, в том числе и в СССР (например, статья В. С. Зарицкого, В. Б. Светникова, Л. И. Шимелевича) [67]. К сожалению, в настоящее время в России эти исследования практически не проводятся, а за рубежом развитие современных методов нелинейной фильтрации на практике прогрессирует благодаря именно методам Монте-Карло [45, 65].

Творческие связи с нашей страной

Говоря о творческих связях Р. Калмана с нашей страной, следует заметить, что с большинством российских (советских) ученых Р. Калман познакомился во время своего первого пребывания в 1960 г. на Первом Всемирном конгрессе международной федерации по автоматическому управлению (ИФАК) в Москве. Конгресс ИФАК был значительным событием для науки того времени, на него собралось 1190 участников и более 1000 приглашенных из 29 стран. Именно на этом конгрессе Р. Калман познакомился с Р. Стратоновичем, и впоследствии они имели достаточно длительную переписку [31].

В этом же году он впервые встретился с выдающимся советским математиком Л. С. Понтрягиным (1908–1988). Более близкое их знакомство состоялось в 1969 г. в Тбилиси, затем по инициативе Р. Калмана Л. С. Понтрягин был приглашен в США [68].

Калман также много раз встречался с Я. З. Ципкиным (1919–1997) [69], который, в частности, редактировал книгу "Очерки по математической теории систем" при ее переводе на русский язык [8].

Р. Калман вел переписку с А. И. Лурье (1901–1980), что следует из биографии к работе [5]. Он был хорошо знаком с В. С. Пугачевым (1911–1998) [15, 46]. Кстати сказать, в статье Калмана [3] имеются три ссылки на работы советских ученых: две на В. С. Пугачева и одна на В. В. Соловьевника (1910–1992).

Из наших современников, поддерживающих творческие контакты с Р. Калманом, необходимо отметить председателя национального комитета по автоматическому управлению академика РАН А. Б. Куржанского, также имеющего значительные достижения в области теории фильтрации [48], и известного ученого Санкт-Петербургского университета — члена-корреспондента РАН профессора В. А. Якубовича. Специалистам хорошо известна лемма Калмана—Якубовича—Попова, устанавливающая связь между частотными методами в теории управления и методами функций Ляпунова и опубликованная в 1962 г. [70]. Эта работа, кстати, небольшая по объему — всего 4 странички — также попала в специальный том 25 лучших публикаций в теории управления и послужила началом дальнейших значительных исследований в этой области [71]. Р. Калман получил близкие результаты годом позже, используя для доказательства понятия управляемости и наблюдаемости [71, 72].

Последний на сегодняшний день визит Р. Калмана в нашу страну состоялся в июне 2006 г. В Москве Р. Калмана принимал вице-президент Академии наук Н. Платэ. Р. Калман посетил "Звездный городок" и выступил с лекцией в Московском государственном университете, а также побывал в Математическом институте им. В. М. Стеклова.

В Санкт-Петербурге Р. Калман встречался в Доме ученых с Президентом АНУД, председателем Санкт-Петербургской группы национального комитета по автоматическому управлению академиком РАН В. Г. Пешехоновым, а потом состоялась памятная для многих ученых нашего города лекция под названием "Центральная проблема в теории систем: история, прогресс и надежды" [73].

Заключение

В заключение хотелось бы обратить внимание на следующее обстоятельство. Начиная с семидесятых годов, Р. Калман стал критически оценивать обоснованность использования стохастического способа описания сигналов при решении прикладных задач. Наиболее отчетливо это проявляется в следующих его высказываниях. В докладе, сделанном им в 1984 г. на конференции, посвященной 50-летию института математики им В. А. Стеклова в Москве, говорится: "...Побудительной причиной как для этого доклада, так и для моих размышлений последних лет явилась одна мысль академика Л. С. Понтрягина, высказанная им в октябре 1969 г. во время посещения Стенфорда. Я настолько хорошо помню это событие, что могу процитировать ее дословно: "Математики не верят в вероятность" [9]. В более поздней работе Р. Калман также отмечает: "...Случайный процесс представляет собой абстрактную придуманную конструкцию, но не такую, которая может быть воссоздана с помощью измерений. Процедуры для определения параметров случайного

процесса являются косвенными. Если случайный процесс существует в аксиоматическом смысле, используемом в работе [3] (первая работа о фильтре Калмана), а есть и такие люди, включая настоящего автора, которые утверждают обратное, то с фильтром Калмана все будет хорошо, так как все это математика. В противном случае вопрос может остаться открытым. Ответственность ложится на тех, кто хочет применить фильтр Калмана любой ценой..." [10].

Полностью разделяя мысль об ответственности тех, кто хочет применить фильтр Калмана любой ценой, следует констатировать, однако, что несмотря на реально существующие и справедливо отмечаемые Р. Калманом недостатки вероятностного подхода, алгоритмы, полученные в рамках этого подхода, активно применяются и эффективно работают при решении разнообразных прикладных задач.

Список литературы

1. Autolas A. S., ed. Mathematical System Theory, The Influence of R. E. Kalman, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
2. Basar T., ed. Control theory. Twenty five seminal papers (1932–1982) // IEEE. 2001.
3. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Trans. ASME (J. Basic Eng.). 1960, V. 82 D.
4. Kalman R. E. Contributions to the Theory of Optimal Control // Bol. Soc. Mat. Mexicana. 1960. 5. P. 102–119.
5. Kalman R. E. Mathematical Description of Linear Dynamical Systems // SIAM J. Control. 1963. V. 1. P. 152–192.
6. Калман Р. Об общей теории систем управления // Тр. 1-го конгр. ИФАК. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 2. С. 521–547.
7. Калман Р. Е., Бьюси Р. С. Новые результаты в теории линейной фильтрации и предсказания // Теоретические основы инженерных расчетов. 1961. № 1. Сер. Д.
8. Калман Р., Фалб П., Арбид М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
9. Калман Р. Е. Идентификация систем с шумами // Успехи мат. наук. 1985. Т 40: 4 (244). С. 27–41.
10. Калман Р. Ньютонаанская революция в технологии систем. Открытие или изобретение // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 6.
11. Калман Р. Когда линейная система является оптимальной? // Теоретические основы инженерных расчетов. 1964. № 1. Сер. Д.
12. Курдюков А. П. От теории LQG к минимаксной фильтрации и управлению: Доклад на семинаре ИПУ РАН 1.04.2010 Современные методы навигации и управления, посвященном 80-летию Рудольфа Эмиля Калмана // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11.
13. Рубинович Е. Я. 50 лет фильтру Калмана. Современные методы навигации и управления: Доклад на семинаре ИПУ РАН 1.04.2010 Современные методы навигации и управления, посвященном 80-летию Рудольфа Эмиля Калмана // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11.
14. Grewal M., Andrews A. P. Kalman Filtering. Theory and Practice. Prentice Hall, Information and System Sciences Series. T. Kailath, Series Editor, 1993.
15. Синицын И. Н. Фильтры Калмана—Пугачева. М.: Логос 2006.
16. Синицын И. Н., Степанов О. А. Рудольф Калман в России // Наукомиссия технологии. 2007. № 8. С. 92–106.
17. Sorenson H. W. Least Square Estimation from Gauss to Kalman // IEEE spectrum. 1970. V. 7. July. P. 63–68.
18. Lainiotis D. G. Estimation: brief survey // Information Sciences. 1974. V. 7. P. 191–202.
19. Kailath T. A View of Three Decades of Linear Filtering Theory // IEEE Trans. Information Theory. 1974. V. IT-20. P. 146–181.

20. **Schmidt S. F.** Kalman Filter: its Recognition and Development for Aerospace Applications // AIAA Journ. of Guidance and Control. 1981. V. 4. P. 4—7.
21. **Battin R. H.** Space Guidance Evolution-a personal narrative // AIAA Journ. of Guidance and Control. 1982. V. 5. P. 97—110.
22. **Kailath T.** From Kalman Filtering to Innovations, Martingales, Scattering and Other Nice Things. In Autolas A.S., ed., Mathematical System Theory, The Influence of R. E. Kalman, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
23. **Anderson B. D. O., Morre J. B.** Kalman Filtering: Whence, What, and Whither? In Autolas A. S., ed., Mathematical System Theory, The Influence of R. E. Kalman. Springer-Verlag, Berlin, 1991.
24. **Тихонов В. И.** Развитие в СССР теории оптимальной фильтрации сообщений // Радиотехника. 1983. № 11.
25. **Тихонов В. И.** Развитие прикладных методов оптимальной фильтрации // Радиотехника. 1996. № 7.
26. **Тихонов В. И.** Развитие в России оптимального нелинейного оценивания случайных процессов и полей // Радиотехника. 1999. № 10. С. 4—20.
27. **Шахтарин Б. И.** Фильтры Винера и Калмана. М.: Гелиос. APB, 2008.
28. **Kolmogoroff A.** Sur l'interpolation et extrapolation des suites stationnaires, Comptes Rendus de l'Acad. Sci., Paris. 1939. 208. P. 2043—2045.
29. **Колмогоров А. Н.** Интерполирование и экстраполирование случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. Матем. 1941. Т. 5, 1. С. 3—14.
30. **Wiener N.** Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series, with engineering applications. John Wiley, New York, 1949 (Originally issued in February 1942, as a classified Nat. Defense Res. Council Rep.).
31. **Профессор Р. Л.** Стратонович (1930—1967). Воспоминания родных коллег и друзей / Под ред. Ю. М. Романовского. М.—Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2007.
32. **Соловьев Ю. А., Ярлыков М. С.** 80 лет со дня рождения Р. Л. Стратоновича // Автоматика и телемеханика. 2010. № 7. С. 185—188.
33. **Ярлыков М. С., Миронов М. А.** Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993.
34. **Стратонович Р. Л.** К теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных функций // Теория вероятностей и ее применение. 1959. Т. 4. Вып. 2. С. 239—242.
35. **Стратонович Р. Л.** Оптимальные нелинейные системы, осуществляющие выделение сигнала с постоянными параметрами из шума // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1959. Т. 2. С. 862—901.
36. **Стратонович Р. Л.** Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М.: Изд-во МГУ, 1966.
37. **Jazwinski A. H.** Stochastic processes and filtering theory. N. Y.: Academic Pres, 1970.
38. **Gelb A., Kasper J., Nash R. A., Price C., Sutherland A.** Applied optimal estimation // M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1974.
39. **Astrom K. J.** Adaptive control. In Autolas A. S. ed., Mathematical System Theory, The Influence of R. E. Kalman, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
40. **Busy R. S., Senne K. D.** Digital synthesis of nonlinear filters// Automatica. 1971. V. 7. N 3. P. 287—298.
41. **Alspach D. L., Sorenson H. W.** Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximations // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Syst. 1972. V. AC-17. N 4. P. 439—448.
42. **Логинов В. П.** Приближенные алгоритмы нелинейной фильтрации // Зарубежная радиоэлектроника. 1975. № 2. Ч. 1. С. 28—48; 1976. № 3. Ч. 2. С. 3—28.
43. **Степанов О. А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ ЦНИИ "Электроприбор", 1998.
44. **Bergman N.** Recursive Bayesian Estimation. Navigation and Tracking Applications. PhD. Dissertations N 579 1999. Department of Electrical Engineering Linkoping University, SE-581-83 Linkoping, Sweden.
45. **Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н.** Статистика случайных процессов. М.: Наука, 1974.
46. **Пугачев В. С.** Стохастические дифференциальные системы. М.: Наука, 1985.
47. **Фомин В. Н.** Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984.
48. **Куржанский А. Б.** Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
49. **Розов А. К.** Нелинейная фильтрация сигналов // Политехника. 2002. 372 с.
50. **Faurre P.** Kalman Filtering and the Advancement of Navigation and Guidance. In Autolas A.S., ed., Mathematical System Theory, The Influence of R. E. Kalman, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
51. **Красовский А. А., Белоглазов И. Н., Чигин Г. П.** Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979.
52. **Челпанов И. Б.** Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М.: Наука, 1967.
53. **Богуславский И. А.** Методы навигации и управления по не полной статистической информации. М.: Машиностроение, 1970.
54. **Ривкин С. С.** Метод оптимальной фильтрации Калмана и его применение в инерциальных навигационных системах. Ч. 1, 2. Л.: Судостроение, 1973, 1974.
55. **Ривкин С. С., Ивановский Р. И., Костров А. В.** Статистическая оптимизация навигационных систем. Л.: Судостроение, 1976.
56. **Кузовков Н. Т., Салычев О. С.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982.
57. **Дмитриев С. П.** Высокоточная морская навигация. Л.: Судостроение, 1991.
58. **Бабич О. А.** Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991.
59. **Степанов О. А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2009.
60. **Daum F.** Nonlinear Filters: Beyond the Kalman Filter // IEEE Aerospace and Electronic Systems Tutorials. 2005. V. 20 (8). P. 57—71.
61. **Juiler S. J., Uhlmann J. K.** Unscented Filtering and Non-linear Estimation // Proc. IEEE. 2004. V. 92 (3). P. 401—422.
62. **Lefebvre T., Bruyninckx H., De Schutter J.** Nonlinear Kalman Filtering for Force-Controlled Robot Tasks. Springer, Berlin, 2005.
63. **Li X. R., Jilkov V. P.** A Survey of Maneuvering Target Tracking: Approximation Techniques for Nonlinear Filtering // Proc. 2004 SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, San Diego. 2004. P. 537—535.
64. **Van der Merwe R., Wan E. A.** The Unscented Kalman Filter. In: Kalman Filtering and Neural Networks (Haykin S.). John Wiley & Sons. Inc., 2001. P. 221—268.
65. **Doucet A., de Freitas N., Gordon N. J.** Sequential Monte Carlo Methods in Practice. N. Y.: Springer-Verlag, 2001.
66. **Branko Ristic, Sanjeev Arulampalam, Neil Gordon.** Beyond the Kalman Filter: Particle Filter for Tracking Applications. Artech House Radar Library. 2004.
67. **Зарицкий В. С., Светник В. Б., Шимелевич Л. И.** Метод Монте-Карло в задачах оптимальной обработки информации // Автоматика и телемеханика. 1975. № 12. С. 95—103.
68. **Понтиагин Л. С.** Жизнеописание, математика, написанное им самим. М.: Изд-во Комкнига, 2006.
69. **Яков Залманович Цыпкин (1919—1997).** Отв. ред. Б. Т. Поляк. М.: Изд-во ЛКИ, 2007.
70. **Якубович В. А.** Решение некоторых матричных неравенств, встречающихся в теории автоматического регулирования // Докл. АН СССР. 1962. Т. 143. № 6. С. 1304—1307.
71. **Гусев С. В., Лихтарников А. Л.** Очерк истории леммы Калмана—Попова—Якубовича и S-процедуры // Автоматика и телемеханика. 2006. № 11. С. 77—121.
72. **Kalman R.** Lyapunov Functions for the problem of Lure' in Automatic Control // Proc. NASUS. 1963. V. 49. P. 201—205.
73. **Степанов О. А.** Р. Калман в Санкт-Петербурге // Гирокопия и навигация. 2006. № 3. С. 117—121.

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИПУСС РАН ПО УПРАВЛЕНИЮ И МОДЕЛИРОВАНИЮ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 62-5:004.8

В. А. Виттих,

д-р техн. наук, проф., научный советник,
Институт проблем управления
сложными системами РАН, Самара
vittikh@iccs.ru

Проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах

Формулируются проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах: построение онтологических, феноменологических моделей ситуаций и решение задач в открытой форме. Предлагается искать подходы к решению этих проблем в рамках парадигмы ограниченной рациональности принятия решений, постулирующей проведение исследований на стыке естественных и гуманитарных наук, что должно обеспечить возвращение в теорию человека, исключенного из нее в результате привнесения в науки об искусственном принципов классической рациональности.

Ключевые слова: сложная искусственная система, организация, холон, актор, коммуникация, самоорганизация, ситуация, неопределенность, феноменология, онтология, задача в открытой форме, система реального времени

Введение

Сложные искусственные системы, к числу которых принадлежат разнообразные социальные, экономические и социотехнические системы, относящиеся как к производственной сфере, бизнесу, так и к госсектору, представляют собой системы, которые:

- предназначены для удовлетворения духовных и материальных потребностей людей путем производства товаров и оказания им соответствующих услуг;
- создаются и функционируют при участии людей;
- являются открытыми системами, взаимодействующими с окружением посредством вещества, энергии и информации;
- организуются в виде динамически упорядоченных целостностей, в которых образуются и совершенствуются взаимосвязи между частями целого;
- характеризуются неопределенностью и изменчивостью возникающих в них проблемных ситуаций, побуждающих людей принимать решения.

Процессы принятия решений (рассматриваемые как синоним термина "процессы управления" [1]) призваны трансформировать развитие ситуации в сложной искусственной системе в желаемом направлении, и от того, насколько эти решения своевременны и адекватны реальной обстановке, будет зависеть качество произведенных товаров и предоставленных услуг. Речь идет, таким образом, о ситуационном управлении, которое должно придать необходимую гибкость процессам принятия решений путем отслеживания и учета изменений, происходящих в системе и ее окружении. Однако, несмотря на то, что идея Р. Моклера [2] с большим интересом и энтузиазмом была воспринята управленцами, за сорок лет после ее опубликования не были разработаны методы и средства, которые позволили бы на практике реализовать преимущества ситуационного подхода к управлению [3].

Основная причина таких "застойных" явлений — методологическая, связанная с использованием исследователями, как правило, исключительно методов естественных наук, с их опорой на классическую рациональность и причинно-механическую картину мира. Понимая ключевую роль этих методов при исследованиях и создании систем управления техническими объектами, следует признать их ограниченные возможности при решении проблем управления и моделирования в сложных искусственных системах, что приводит к целесообразности применения в качестве методологического фундамента парадигмы ограниченной рациональности принятия решений [4, 5].

Поскольку принятие решений всегда происходит в некоторой ситуации, термин "сituационное управление" здесь был бы уместен. Однако для того чтобы избежать дискуссий в области терминологии, связанных с различной трактовкой понятия "сituационное управление" в литературных источниках, этот термин в дальнейшем не будет использоваться.

1. Целостная картина мира

Теория управления техническими системами базируется на причинно-механической картине мира, т. е. представлении о мире, согласно которому все явления вызываются причинами и оцениваются в соответствии с законами классической механи-

ки, а человек играет роль "колесика" в мировом "приводе" [6]. Такая научная рациональность исходит из познания действительности "как она есть сама по себе" без примеси человеческой субъективности [7].

Однако в сложных искусственных системах субъективный человеческий фактор не позволяет полагать процессы, происходящие в таких системах, подобными объективным процессам в окружающем нас природном мире. "И если в естественных явлениях все выглядит "неизбежным", что вызвано непререкаемостью естественных законов, то на искусственных явлениях всегда лежит печать "свободы выбора" [8].

Причинно-механическая картина мира постулирует, что выходной результат (следствие) одного элемента системы является входом (причиной) для другого, а сам элемент реализует некоторую функцию, преобразующую причину в следствие. Образующиеся "каузальные цепочки" могут служить адекватными идеализированными моделями явлений и процессов, происходящих в замкнутых технических системах, но оказываются практически неприемлемыми в сложных искусственных системах, где каузальный принцип превращает человека в автомат, призванный исполнять преобразование входного воздействия в выходной результат по жесткой программе.

Поэтому управление сложными искусственными системами должно опираться на *целостную картину мира*, в которой отношения между элементами системы строятся по принципу "*часть—целое*" [9]. Каждая часть, рассматриваемая как самодостаточное целое, взаимодействует с другими частями-целостностями и может образовывать совместно с ними целостности более высокого порядка. Целостность, участвующая в становлении новых целостностей, называется холоном (от греч. "holos" — весь, целый с суффиксом "on", обозначающим часть, частицу) [10]. Иными словами, холон — это целое, являющееся частью другого большего целого.

В этом термине заложена суть целостного подхода к организации сложных искусственных систем, базирующихся на противоречивых устремлениях человека: с одной стороны, это стремление к автономности, самодостаточности, а с другой — к кооперации, взаимозависимости для удовлетворения своих потребностей путем объединения усилий с другими людьми. В отличие от каузального подхода с его воздействием одного элемента на другой, целостная картина мира предполагает *взаимодействие целостных компонентов*.

Главным "действующим лицом" холона является *актор* — человек, взявший на себя (или получивший) полномочия по управлению холоном, несущий ответственность за последствия принимаемых решений. Актор изучает проблемную ситуацию, сложившуюся в системе, и принимает решения

о путях выхода из нее, согласуя свои действия с другими акторами. Иными словами, актор не столько отражает окружающий мир, сколько творит его. Каждый актор может иметь собственную точку зрения как на отдельные процессы, происходящие в сложной искусственной системе, так и на проблемную ситуацию в целом, т. е. акторы являются *неоднородными* [11].

"Атомарный" холон — это отдельно взятый актор. Актор вместе с обеспечивающими его деятельность трудовыми и материальными ресурсами образуют *базовый холон*. В свою очередь, группа базовых холонов может образовывать составной холон, который может вступать в отношения с другими холонами. При этом *назначение и цели* сложной искусственной системы не являются жестко заданными априори, а могут определяться и корректироваться "*изнутри*" в процессах взаимодействия акторов, представляющих самодостаточные холоны. Эта способность генерировать цели принципиально отличает такие открытые системы от закрытых систем, конструируемых под конкретную цель, заданную "*сверху*", и организованных по причинно-следственному принципу.

Единство человека и мира отражено в фундаментальной онтологии М. Хайдеггера [12]. Его *Dasein* ("вот-бытие", "здесь-бытие", "присутствие") означает не просто объективное бытие, а собственное отношение человека к бытию. Человек не только есть, но соотносится с собой, миром и миром других людей [13]. В соответствии с этим взорвием целостная картина мира предполагает погружение каждого актора в "мир смыслов" других акторов, что дает возможность достичь *взаимопонимания*, т. е. постичь и истолковать их мысли и переживания, осознать их роли в системе целого — сложившейся проблемной ситуации.

Но дело не только во взаимодействии людей-акторов. Ситуация объединяет во взаимодействии, наряду с людьми, разнообразные природные, искусственные и абстрактные объекты. Все эти неживые сущности человек наделяет смыслами; его сознание конструирует мир, в котором неживые объекты ведут себя по правилам, предписанным человеком. Выражаясь метафорически, все живые и неживые сущности, оказавшись в общей для них проблемной ситуации, начинают взаимодействовать, стремясь сообща найти выход из нее. Но каждая сущность, понимая общую задачу *снизить неопределенность ситуации до приемлемого уровня*, действует, исходя из собственных интересов и ценностных установок, которые может, ко всему прочему, и изменить в процессах коллективного выбора [4].

Если неопределенность не удается уменьшить в рамках локальных взаимодействий, то ее урегулирование происходит на глобальном уровне путем создания разнообразных социальных институтов и выработки нормативно-правовых документов и пра-

вил поведения. Возникает так называемая *циклическая причинность*: локальные взаимодействия порождают глобальные структуры, которые, в свою очередь, воздействуют на локальный уровень, снижая в какой-то степени, неопределенность ситуации. Если по какой-то причине неопределенность снова возрастает, формулируются новые правила. Циклическая причинность в сочетании с неопределенностью составляют основу *социальной самоорганизации*, понимаемой как возникновение социального порядка из локальных (в общем, случайных) взаимодействий. При этом самоорганизация возможна только в открытых системах, где ресурсы окружающей среды "подпитывают" циклическую динамику самоорганизации [9, 14].

Целостная картина мира предполагает, что целое — не только "общее частей", но и единство внутренних противоположностей [15, 16], что приводит к необходимости введения понятия *сопряженных сущностей*. Дело в том, что сложные искусственные системы конструируются таким образом, чтобы одни сущности (живые, неживые, абстрактные), обладающие некоторыми *возможностями*, удовлетворяли бы *потребности* других. Такие пары могут быть названы сопряженными сущностями. Например, "водитель—грузовик", "пациент—врач", "ветеран труда—закон о льготах, предоставляемых ветеранам труда" и т. п. Эта особенность сложных искусственных систем может быть выгодно использована при решении проблем управления и моделирования в таких системах.

Изложенное видение целостной картины мира и парадигма ограниченной рациональности принятия решения [4, 5] дают возможность сформулировать основные проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах.

2. Построение онтологических и феноменологических моделей ситуаций

Причинно-механическая картина мира предполагает возможность построения математических моделей объектов управления. Математическая модель разрабатывается на базе некоторой научной теории, включающей в себя идеализированный объект, ядро теории (совокупность понятий и отношений между ними) и исчисление (правила вывода и способы доказательств) [17, 18]. Наблюдая объект "со стороны" через "призму" этой теории, человек-аналитик "объективно" (независимо от своих субъективных позиций) описывает его на соответствующем математическом языке, после чего (с помощью исчисления теории) он может сделать формальные выводы, например, предсказать поведение объекта в будущем. Иными словами, *математическая модель* представляет собой формально исчисляемый образ объекта.

Целостная картина мира, базирующаяся на отношении между элементами по принципу "часть—целое", не дает возможности использовать какое-либо исчисление, поскольку "целостность" не может стать элементом "каузальной цепочки", преобразующим "причину" в "следствие". В этом случае ключевую роль в задачах моделирования сложных систем начинает играть понятие "*онтология*" — концептуальная модель некоторой предметной области [19], а если объектом управления становится ситуация, то может быть использована *онтологическая модель ситуации*, представляющая собой описание ситуации в форме персональных, групповых онтологий и объектных моделей, разрабатываемых в процессах взаимодействия неоднородных акторов, находящихся в этой ситуации и имеющих возможность изучать и воздействовать на нее [5]. При этом понятия, используемые в онтологиях, являются общими, разделяемыми всеми акторами, а их формирование происходит в процессах построения феноменологических моделей ситуаций.

Дело в том, что в основе целостной картины мира находится высшая форма органической целостности — *человек, наделенный сознанием*, т. е. способностью оперировать образами социальных взаимодействий, природных и культурных связей, действий с предметами, отделенными от непосредственных контактов с людьми и актов деятельности. Сознание фиксирует социальную связь в самом индивиде. Эта связь обнаруживается в нем как "*сознание*", т. е. как разделенное с другими людьми знание о необходимом содействии в воспроизведстве социального процесса. Любое описание вещей, какими они являются в сознании, — *феноменов* — можно назвать феноменологическими.

Соответственно, феноменология есть не учение о самой сущности, а наука о сознании, созерцающем сущность. Важнейшей особенностью сознания является интенциональность, т. е. сознание есть сознание о чем-либо. Интенциональный акт, нацеленный на предмет — свидетельство активности сознания и его "*конечности*". Сознание сразу и создает предмет интереса и, ограничивая себя определенной предметной областью, становится конечным. Поэтому в феноменологии Э. Гуссерля *слова* не столько обозначают объекты из мира независимой от человека реальности, сколько рождаются *вместе с предметами человеческого интереса* [20]. Термин "*конституирование*" используется в феноменологии для обозначения процессов *формирования человеческим сознанием его предметных целостностей* [21].

Предмет как целостность (а мы видим его именно как целостность) — это факт сознания, не сама вещь, и не комплекс ощущений: это совокупность данных *чувственного содержания, нагруженная смыслом*. Наряду с синтезом предметов как целостностей, в своей совокупности составляющих

предметный мир каждого человека, происходит и синтез самого сознания как всеобъемлющей непрерывной целостности, которая "содержит" все (и любые) интенциональные предметы, не только действительные, но и возможные (впрочем, и невозможные тоже) [19].

Феноменология опирается на принцип *беспредпосыленного познания*, в соответствии с которым феноменологический опыт должен быть огражден от любых привносимых извне допущений. Поэтому феноменология претендует на статус науки о "первоистоках" знания. Точнее, она представляет собой не какую-то теоретическую конструкцию, а практику особого рода, направленную на раскрытие и *осмысление первичного опыта*, не затронутого классической наукой и ее идеализациями [22]. *Феноменологический анализ* вычленяет в явлении или объекте содержание сознания (в отличие от причинного анализа) [6].

Этот до- и внетактный мир, называемый в феноменологической социологии *жизненным миром*, предшествует научно-теоретическому миру, который представляет его "опредмечивание". Жизненный мир складывается из интерсубъективных отношений между людьми, где в ходе непосредственных контактов между индивидами вырабатываются *личностно-окрашенные значения*, которыми наделяются социальные процессы. Интерсубъективность, таким образом, представляет собой структуру индивидуального сознания, отвечающую факту существования в сложившейся ситуации других индивидов и указывающую на внутреннюю социальность индивидуального сознания [15].

На основании изложенного можно ввести понятие *феноменологической модели ситуации*, описывающей мысленный образ ситуации в сознании человека, который является результатом осмыслиения ситуации. Именно сознание является смыслообразующим источником мыслительной деятельности человека, способным создавать свой собственный мир обыденных и научных понятий. Содержанием понятия является смысл, который не может быть сугубо индивидуальным, он должен быть понятен многим [22]. И когда мы говорим об онтологиях и онтологических моделях ситуаций, то подразумеваем, что набор понятий нам известен, четко определен и разделяется всеми, кто намерен его использовать. Однако в реальной жизни понятия могут быть не всем известны, "размыты" и, соответственно, не всеми разделяемы. А это означает, что формирование понятий должно происходить в процессе принятия решения о том, каким образом выйти из проблемной ситуации, которая ко всему прочему обычно имеет тенденцию изменяться со временем.

В этих условиях сознание человека, конституирующее мысленную картину ситуации, должно успевать "отслеживать" ее изменения на феномено-

логическом уровне, оперируя, возможно, уже не понятиями, а представлениями.

Представление — образ, вновь созданный творческой активной деятельностью мышления, или образ ранее воспринимаемого предмета [22]. Оно занимает промежуточное положение между "восприятием" и "понятием". Представление — это наглядный чувственный образ предметов и ситуаций действительности, данный сознанию и, в отличие от восприятия (характеризующего переживание самого контакта с реальным миром), сопровождающийся чувством отсутствия того, что представляется [23]. Вместе с тем, представление уже относится к опосредованному мышлению и связано с образованием понятий [22].

Построение феноменологической модели ситуации, описывающей "первичный опыт" и начинающейся с "чистого листа", предшествует разработке ее онтологической модели. С помощью феноменологической модели человек понимает *смысл ситуации* в его интерсубъективном, коммуникативном контексте. "Поскольку "я" может лишь частично составить мир, оно принимает от других то, чего не достает в его собственном прямом опыте... Мир индивидуальных убеждений, мнений и оценок конституируется как в акте прямой интуиции, так и благодаря актам коммуникации" [15].

3. Решение задач в открытой форме

Создание сложных искусственных систем предполагает, с одной стороны, *адресное предоставление услуг* и производство товаров индивидуального потребления для каждого человека, а с другой — *выполнение им* (человеком) определенной *общественной роли* в процессах производства товаров и услуг. Оказавшись вместе с другими людьми в некоторой проблемной ситуации, индивидуум должен решать *двуединую задачу* удовлетворения собственных потребностей при одновременном предоставлении своих возможностей (ресурсов) для удовлетворения потребностей других в общем солидарном стремлении найти выход из сложившейся ситуации. Таким образом, принятие решения о том, какие консолидированные действия нужно предпринять, будет результатом сложной цепи взаимодействий людей-акторов в условиях неопределенности, обусловленной развитием ситуации и возможными изменениями позиций (точек зрения) самих акторов. Это уже не привычный выбор из ограниченного множества альтернатив, характерный для классической теории принятия решения, а *решение задач в открытой форме* [4].

Такие задачи решаются при коллегиальном управлении, когда принятие решений осуществляется группой лиц, каждое из которых несет персональную ответственность за определенную область деятельности [24]. Поэтому любую проблемную

ситуацию, сложившуюся в системе, это действующее лицо (актор) рассматривает со своей субъективной точки зрения, хотя выход из создавшегося положения должен быть найден совместными усилиями, т. е. принятие решений происходит в условиях, когда необходимо согласовывать индивидуальные (относящиеся к сфере деятельности акторов) и групповые (общие для всех акторов) интересы, которые чаще всего являются противоречивыми.

Представить эту задачу в замкнутой форме [25] не представляется возможным, поскольку в самой ее постановке заложена неопределенность, не позволяющая удалить неполноту, избыточность, неоднозначность и т. д., а прагматика и семантика задачи не могут быть описаны в формализованном виде, что, в свою очередь, не позволяет использовать для ее решения какие-либо методы математического программирования. Если выразиться более корректно, то, конечно же, любой задаче после введения разнообразных допущений и ограничений можно придать формализованную постановку, допускающую применение математики. Однако срочность и точность решения приобретаются, как правило, потерей связей с реальностью. Поэтому для решения рассматриваемых задач, которые практически не могут быть формализованы в рамках классических подходов, необходимо принципиально изменять точки зрения на проблему, применяя новые парадигмы. С этой целью в данной статье предлагается использовать парадигму ограниченной рациональности принятия решений [4, 5].

Задачи в открытой форме решаются на основе коммуникации — понятия, отражающего смысловой и идеально-содержательный аспект взаимодействия акторов. Действия, сознательно ориентированные на их смысловое восприятие, называют коммуникативными. Основная функция коммуникации — достижение социальной общности при сохранении индивидуальности каждого актора. Структура коммуникации включает в себя [26]:

- акторов-коммуникаторов, наделенных сознанием и владеющих нормами некоторой семиотической системы (языка);
- ситуацию, которую они стремятся осмыслить и понять;
- тексты, выражющие смысл ситуации в языке;
- цели, делающие тексты направленными, т. е. то, что побуждает акторов обращаться друг к другу;
- процесс материальной передачи текстов.

Ю. Хабермас различает инструментальное и коммуникативное поведение. Первое направлено на реализацию определенного интереса, а не на достижение взаимопонимания, а второе — на создание упорядоченной нормативной системы устойчивых межличностных отношений. Интеграция акторов в процессах решения задач в открытой форме обеспечивается на путях коммуникативного поведения, которое представляет собой интер-

субъективную связь между субъектами, обладающими языковой компетентностью [22].

В современной неклассической философии коммуникация рассматривается в аспекте продвижения к принципиально неизвестному результату [15], а в синергетике предпринята радикальная попытка заменить классические понятия цели и критерия закономерностями самоорганизации нелинейных систем [22]. В практике создания и функционирования сложных искусственных систем также приходится сталкиваться с проблемой выбора критериев принятия решений, поскольку индивидуальные и групповые интересы коммуницирующих акторов, как уже отмечалось выше, являются противоречивыми. Однако есть категория, их объединяющая, — это время, "экономия которого" (в широком смысле) создает основу для повышения других показателей качества, в том числе эффективности системы в целом. При этом понятие "время" необходимо перевести из разряда ограничений в критерий, т. е. в средство для решения, в главный отличительный признак, на основании которого проводится оценка чего-либо [24].

Поскольку сложные искусственные системы предназначены для адресного производства товаров и оказания услуг, то в качестве критерия может быть использовано *сокращение времени между возникновением и удовлетворением потребностей каждого человека*. Этот тезис, например, обосновывается в работе [27] с опорой на известную существующую диспропорцию: превышение времени обращения товаров над временем их производства. При длительном временном пути движения товаров от производства до неизвестного потребителя происходит невозвратность денежных средств, что является серьезным тормозом экономического развития. Поэтому каждый актор (или хозяйствующий субъект) должны строить свободно и добровольно программу своей деятельности на основе прямых (горизонтальных) связей, регулируемых, с одной стороны, законом (государством), а с другой — контрактом (соглашением одной или более сторон). При этом речь идет не об удовлетворении потребностей абстрактного потребителя, а конкретного индивида, т. е. о прямой взаимосвязи производства и потребления: все, что произведено, должно быть потреблено. Добиться этого можно только через прямой заказ конкретного человека.

Поскольку любая жизненная ситуация имеет тенденцию к изменению, решение задач в открытой форме должно происходить в реальном масштабе времени, т. е. в темпе, соответствующем скорости развития ситуации, которая характеризуется сменой состояния динамического равновесия. *Динамическое равновесие* в сложных самоорганизующихся системах [9, 14] представляет собой взаимное воспроизведение локальных взаимодействий и глобальных структур на некотором уровне неопределенности.

Флуктуации во внутренней динамике и возмущения окружающей среды постоянно "проверяют" такое взаимное воспроизведение на стабильность. Если в случае критических воздействий какая-либо форма воспроизведения оказывается нестабильной, возникает новая форма. В этом смысле самоорганизация является гарантом приспособления к критическим изменениям среды [14]. Таким образом, динамическое равновесие предполагает переход системы в новое равновесное состояние в ответ на возмущения среды, а не возврат в первоначальное состояние. Например, такой переход происходит тогда, когда принимаются новые нормативные акты (законы, регламенты и т. д.), регулирующие локальные взаимодействия.

Понятно, что все свои коммуникативные действия, связанные с решением задач в открытой форме, акторы должны успевать совершать в период динамического равновесия, характеризующего относительную стабильность ситуации, сложившейся в сложной искусственной системе. В противном случае задержки в принятии решений могут привести к неожиданным и негативным последствиям, порождающим новые проблемы, требующие решения.

Заключение

Построение онтологических и феноменологических моделей ситуаций, а также решение задач в открытой форме являются актуальными проблемами управления и моделирования в сложных искусственных системах. Эти проблемы связаны с необходимостью принятия коллегиальных решений группой коммуницирующих лиц (неоднородных акторов), каждое из которых несет персональную ответственность за определенную область деятельности, в условиях неопределенности и изменчивости ситуации. Подходы к решению сформулированных проблем предлагается искать в рамках парадигмы ограниченной рациональности принятия решений [4, 5], постулирующей проведение исследований на стыке естественных и гуманитарных наук, что должно обеспечить возвращение в теорию человека, исключенного из нее в результате привлечения в науки об искусственном принципах классической рациональности.

Поскольку ключевую роль в решении проблем управления и моделирования в сложных искусственных системах играет коммуникация, особое значение приобретает использование новых информационно-коммуникационных технологий, специального программистского инструментария для поддержки процессов принятия решений, включающего в себя конструкторы онтологии [28], мультиагентные модели взаимодействия [29], средства ком-

позиции онтологии [30], управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени [31], структуризации эмпирической информации и ее визуализации [32] и др.

Список литературы

1. Джонсон Р., Каст Ф., Розенцвейг Д. Системы и руководство (теория систем и руководство системами). М.: Советское радио, 1971.
2. Mockler R. I. Situational theory of management // Harvard Business Review. 1971. V. 49. № 3.
3. Савченко А. Б. Искусство управления ситуацией: опыт Востока и Запада. М.: Маркет DC, 2006.
4. Виттих В. А. Парадигма ограниченной рациональности принятия решений — 1 // Вестник Самарского государственного технического университета (серия "Технические науки"). 2009. № 3 (25). С. 22–31.
5. Виттих В. А. Парадигма ограниченной рациональности принятия решений — 2 // Вестник Самарского государственного технического университета (серия "Технические науки"). 2010. № 2 (26). С. 23–31.
6. Философский энциклопедический словарь. М.: ИНФРА-М, 1997.
7. Кохановский В. П., Лешкевич Т. Г., Матяш Т. П., Фатхи Т. Б. Основы философии науки. Ростов н/Д: Феникс, 2004.
8. Саймон Т. Науки об искусственном. М.: Мир, 1972.
9. Виттих В. А. Целостность сложных систем. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. IV Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2002. С. 48–58.
10. Köstler A. The Ghost in the Machine. Arcana books, London, 1989.
11. Виттих А. Процессы управления в социотехнических системах. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. VII Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2005. С. 32–42.
12. Хайдеггер М. Бытие и время. Харьков: Фолио, 2003.
13. Теория философии / Э. Ф. Звездина и др. М.: Филологическое общество "Слово"; Эксмо, 2004.
14. Küppers G. Self-organization — The Emergence of Order. From local interactions to global structures. <http://www.unibielefeld.de/iwt/sein/paperno2.pdf>, July 1999.
15. Современный философский словарь. Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва: ПАНПРИНТ, 1998.
16. Виттих А. Знания, основанные на понимании, в процессах принятия решений. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. VI Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2004. С. 37–44.
17. Краткий словарь по логике. М.: Просвещение, 1991.
18. Vittikh V. A. Towards creating of control theory for open organizational systems. Complex systems: Control and modeling problems // Proc. of the II International Conference. The Samara Scientific Center of RAS, Samara, 2000. P. 55–65.
19. Смирнов С. В. Онтологии в задачах моделирования сложных систем. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. II Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2000. С. 66–72.
20. Зотов А. Ф. Современная западная философия. М.: Проспект, 2010.
21. Новая философская энциклопедия. М.: Мысль, 2010. Т. II.
22. Словарь философских терминов. М.: ИНФРА-М, 2004.
23. Новая философская энциклопедия. М.: Мысль, 2010. Т. III.
24. Новый словарь иностранных слов. Мн.: Современный литератор, 2006.
25. Лорье Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. М.: Мир, 1991.

26. Всемирная энциклопедия. Философия. М.: АСТ; Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001.
27. Бондаренко В. М. Новый методологический подход к формированию стратегии развития России. М.: Институт экономики РАН, 2008.
28. Андреев В., Ивкушкин К., Минаков И., Ржевский Г., Скobelев П. Конструктор онтологии мультиагентных систем. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. III Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2001. С. 480–488.
29. Виттих В. А., Скobelев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
30. Виноградов И. Д., Смирнов С. В. Композиция концептуальных схем сложных систем. Проблемы управления и моделирования в сложных системах // Тр. Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 1999. С. 184–189.
31. Виттих В. А., Скobelев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78–87.
32. Виттих В. А., Ситников П. В., Смирнов С. В. Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 5. С. 45–53.

УДК 004.89:004.4

Г. А. Ржевский, профессор,
Complexity Science and Design,
The Open University, UK
george@rhevski.net

Теория сложных систем и мультиагентные технологии: методология для практического использования

Показывается связь теории сложных систем и мультиагентных технологий для решения практических крупномасштабных коммерческих, социальных и технических проблем. Представлена методология, разработанная на основе многолетнего опыта разработки и внедрения систем планирования такси, проката автомобилей, танкеров и грузовиков в режиме реального времени, динамической обработки данных, извлечения новых знаний и семантического поиска закономерностей в текстах.

Ключевые слова: сложная система, непредвиденные события, экстремальная ситуация, самоорганизация, адаптивность, ко-эволюция, планирование в реальном времени

Введение

Если будущее не определено, нет смысла пытаться его предугадать [1]. Именно поэтому разработанные на основе теории вероятности прогнозы часто не играют значительной роли в принятии практических решений в области управления коммерческими и социальными ресурсами, где необходимо своевременно выработать конкретное решение с учетом определенных условий.

В связи с этим возникает вопрос: насколько востребованна теория сложных систем в повседневной жизни [2]? Сможет ли она помочь, например, руководителю океанской транспортной компании транспортировать неочищенную нефть через весь мир и доставить ее в пункт назначения по конкретной цене в сжатые сроки или помочь сотрудникам

службы безопасности банка, чья задача — защитить его от компьютерных атак?

Ответ: "Да". Эта теория просто необходима для решения сложных проблем, связанных с планированием обработки непредвиденных обстоятельств, которые могут подорвать рабочий процесс, с адаптацией существующих социальных, бизнес- и технологических процессов, с настройкой сложных систем с использованием экспериментально полученных эвристик.

Цель настоящей статьи — описать практическую методологию применения теории управления сложными системами, которая была разработана группой специалистов за последнее десятилетие. В ходе разработки проводились эксперименты с крупномасштабными комплексными адаптивными приложениями, которые были разработаны и внедрены в компании Великобритании, США, Германии и России.

Описываемая методология также была успешно применена при создании адаптивных технических систем, таких как роботы для исследования космоса, крупные компрессоры, станки и тракторы, при разработке средств оптимизации и продления жизненного цикла технических конструкций, к примеру, самолетов.

Кроме этого, данная методология была использована при исследовании чрезвычайно сложных вопросов, затрагивающих разнообразные аспекты общественной жизни, таких как эволюция английского языка, глобальный финансовый кризис и даже ликвидация бедности населения.

1. Сложные системы

1.1. Семь критериев сложности

При практическом использовании методологии управления сложными системами необходимо начать с определения ряда критериев, согласно которым проблема может быть признана "сложной".

Будем считать, что проблема является "сложной", если соблюдаются большинство приведенных ниже критерии:

1. **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — система состоит из большого числа различных компонентов (агентов), находящихся в тесном взаимодействии.

2. **АВТОНОМНОСТЬ** — в основном агенты независимы, но в то же время они подчиняются определенным законам, правилам и нормам. Несмотря на то, что не существует единого управляющего центра, их поведение не является хаотичным.

3. **ЭМЕРДЖЕНТНОСТЬ** — общее поведение системы, которое "рождается" в процессе взаимодействия агентов, которое нельзя предсказать.

4. **УДАЛЕННОСТЬ ОТ РАВНОВЕСИЯ** — общее поведение системы "удалено от равновесия" в связи с частым возникновением непредвиденных обстоятельств, которые не позволяют системе вернуться в состояние равновесия.

5. **НЕЛИНЕЙНОСТЬ** — нелинейность периодически приводит к тому, что мелкие проблемы могут привести к большим изменениям на выходе системы ("эффект бабочки").

6. **САМООРГАНИЗАЦИЯ** — система способна к самоорганизации в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

7. **КО-ЭВОЛЮЦИЯ** — система необратимо развивается во взаимодействии с окружающей средой.

1.2. Мировой рынок как сложная система

Рассмотрим соблюдение указанных выше семи критериев сложности на примере мирового Интернет-рынка, который является, пожалуй, наиболее удачным примером сложной системы. Мировой рынок состоит из огромного числа поставщиков, потребителей, инвесторов, кредиторов, вкладчиков, коммерсантов и др., которые вовлечены в процесс

торговли. Участники рынка независимы, но в то же время подчиняются национальным и международным законам, правилам и установленным нормам.

Центральная управляющая система отсутствует.

Распространение предложений по всему миру вызывает реакцию локальных транзакций [3]. Они в общем случае непредсказуемы, хотя в их поведении могут быть выявлены некоторые основные тенденции.

Рынок не стабилен [4]. Частота появления новых транзакций и изменения уже существующих настолько велика, что рынок не успевает "достичь" равновесия.

На мировом рынке периодически возникают экстремальные ситуации примерами которых являются "черная среда", последний финансовый кризис и др. В связи с развитием рынка появление новых экстремальных ситуаций может участиться, и они могут стать еще более опасными [5].

Доказательством непрерывной самоорганизации может быть реакция участников рынка на любое непредвиденное событие, к примеру, изменение или отмена транзакций.

Ко-эволюция общества, экономики и технологий проиллюстрирована на рис. 1. Инструменты нацелены на улучшение качества жизни, изменение экономических показателей, которые, в свою очередь, ведут к изменению общества в целом; созданные инструменты станут доступны, только если общество будет использовать их и инвестировать в них денежные средства.

Важно отметить, что с развитием экономических систем изменяются и ключевые факторы их экономической эффективности. Экономическое преимущество за счет массового производства, являющееся, несомненно, ключевым фактором успеха промышленной экономики, становится все менее значимым в силу возрастания роли сложных систем (или динамик) в экономике знаний. Новым ключевым преимуществом становится адаптивность — способность быстро выдавать правильное решение в ответ на непредвиденные изменения на рынке.

Ко-эволюция прогрессирует согласно схеме, показанной на рис. 2. Процесс схож с процессом изменения парадигмы в науке [6].

1.3. Неопределенность как основная проблема сложной системы

Непредсказуемое изменение окружающей среды, в которой мы живем и работаем, рождает неопределенность.

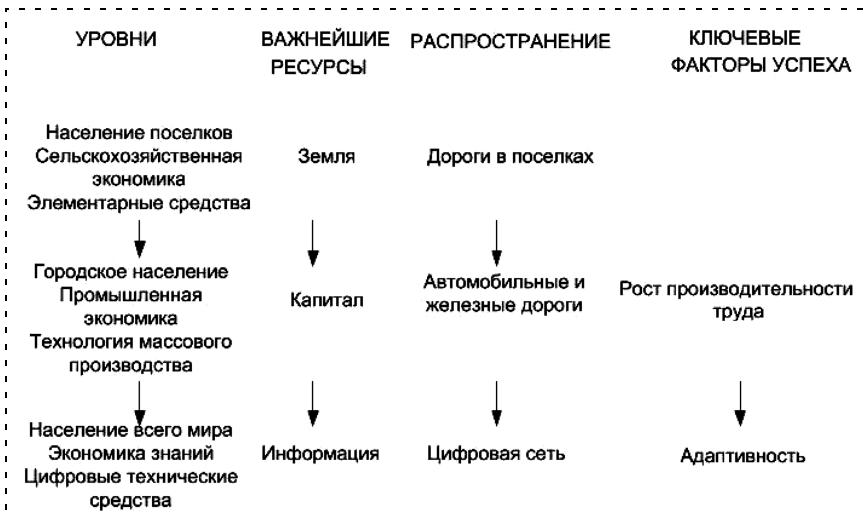


Рис. 1. Ко-эволюция общества, экономики и технологий

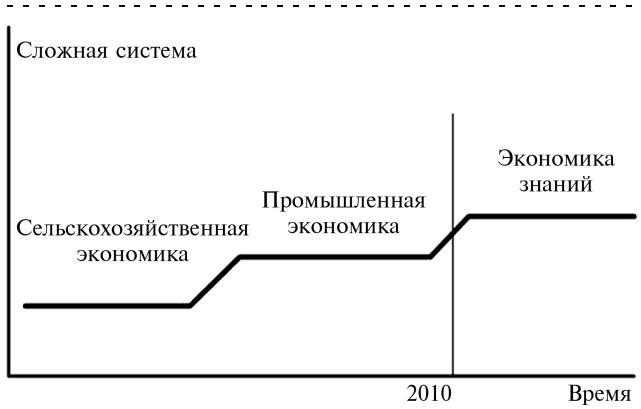


Рис. 2. Поэтапное изменение сложности рынка

До настоящего момента серьезные изменения окружающей среды возникали крайне редко, поэтому мы до сих пор полагаем, что мировое сообщество продолжит функционировать в установленном режиме, по крайней мере, в течение следующего поколения. Мы "застряли" в постулатах детерминизма и предсказуемости ньютоновской науки. Мы полагаем, что редукционизм будет и далее развиваться и общепризнан и что рано или поздно будет найден единственный универсальный закон физики, который позволит объяснить все явления на Земле.

Конечно, мы предпочитаем планировать свою жизнь и впоследствии видеть, как выполняются наши планы. Абсолютная неопределенность кажется нам устрашающей. Как правило, реакция на неоднозначность следующая: "Давайте это прекратим! Кто контролирует ситуацию? Почему она так негативно влияет на меня? Какие действия принимает правительство по этому поводу? Может за этим стоит сообщество преступников?" И, само собой, у нас нет готовых ответов на все эти вопросы, и невозможно остановить время и спастись от пагубного влияния неопределенности. Некоторые могут сбежать в удаленные края, к примеру, туда, где "неопределенность" еще не успела оказать своего влияния, но неужели это лучшее, что мы можем сделать?

Можем ли мы все постараться справиться с этим?

1.4. Управление сложной системой

Часто управление системой связывают с контролем ее поведения. Если предположить, что понятие "контролировать" означает определять дальнейшее поведение системы и следить за тем, чтобы она его придерживалась, то в этом случае сложную систему невозможно контролировать. Само понятие "эмерджентного поведения" системы предполагает невозможность ее контролировать.

Определим некоторые другие ограничения, возникающие при управлении сложной системой. Так, нельзя ликвидировать неопределенность, упростив

сложные ситуации, и даже если мы постараемся использовать жесткие конструкции для описания сложных ситуаций, то эти конструкции рано или поздно разрушатся (достаточно вспомнить страны с плановой экономикой). Также нельзя положиться на современные математические методы прогнозирования для того, чтобы предсказать будущее. Если будущее неизвестно, мы не в силах его предсказать. Кроме этого, нельзя жестко распланировать работу системы при условии часто возникающих непредвиденных обстоятельств. При работе в таких условиях запланированные действия вскоре перестанут соответствовать реальности.

Что же мы в состоянии сделать?

Лучшее, что мы можем сделать, — это начать "управлять сложностью", что значит научиться "справляться" с внешней сложностью и "настраивать" сложную систему (т. е. работать с внутренней сложностью).

1.5. Как справляться со сложностью среды?

Под понятием "справляться со сложностью" будем понимать достижение желаемых результатов при условии, что сложные системы не поддаются контролю (иными словами, существуют неконтролируемые внешние обстоятельства). *Возможность справляться с внешней сложностью является принципиально важной, к примеру, для предприятий, которые занимаются торговлей на мировых рынках.*

Наилучший способ справиться с внешней сложностью — это развить способность к самоорганизации, которая нейтрализует или снизит влияние непредвиденных обстоятельств при их возникновении. Способные к самоорганизации процессы, которые могут достигать цели даже при работе с внешней сложностью, называются *адаптивными*. Развить самоорганизацию возможно при наличии следующих определенных элементов сложной системы:

1) списка дополнительных действий, которые, возможно, придется предпринять при возникновении непредвиденных обстоятельств;

2) технологии принятия решений, способной независимо и быстро выбирать необходимое действие из списка при возникновении экстремальных ситуаций и внедрять выбранное действие до наступления следующего события;

3) ключевых ресурсов, необходимых для выполнения запланированных действий.

Также может пригодиться динамический прогноз появления непредвиденных событий, основанный на их изучении, и возможность мгновенного обновления прогнозов в соответствии с изменениями текущей ситуации.

Внедрение способности к самоорганизации в системах, в которых мы живем и работаем, равносильно разработке самих сложных систем в нашей жизни, что вызывает противоречие. Здравый смысл подсказывает, что нам следует упростить сложность окру-

жающей среды, однако это невозможно, так как по определению окружающая нас среда не поддается контролю.

1.6. Как настраивать сложную систему

В тех случаях, когда мы ответственны за работу сложной системы, мы можем наложить определенные ограничения, которые позволяют удерживать поведение сложной системы в определенных рамках.

Методы настройки сложных систем принципиально важны для тех, кто несет ответственность за их функционирование, к примеру, для руководителей, решающих проблемы в области управления финансово-операциями, здравоохранения, образования, юриспруденции и законодательства, обеспечения безопасности и обнаружения мошенничества, или для менеджеров, несущих ответственность за бизнес-процессы в таких областях, как, например, логистика.

Несмотря на то, что мы не можем повлиять на физические и химические системы, поскольку они подчиняются законам природы, мы в состоянии повлиять на социальные, социально-технические, административные и бизнес-системы, которые подчиняются изданным законам, социальным нормам, конституциям, законодательным актам, стратегиям, правилам и предписаниям.

Общее поведение подобных систем может быть направлено в конкретное русло, но при этом следует убедиться, что установленные правила предельно четко сформулированы, чтобы предупредить хаотичное поведение систем, и в то же время достаточно гибкие для того, чтобы позволить системам находить решения при столкновении с новыми изменениями [7]. Таким образом, наиболее эффективным является определение изменяемых правил, более строгих при работе системы в обычном режиме и более свободных при восстановлении системы после экстремальных ситуаций [8].

Следует отметить, что установление правил не может предупредить нелинейность системы, которая приводит к появлению экстремальных ситуаций. Для того чтобы снизить опасность и частоту воз-

никновения экстремальных ситуаций, необходимо использовать дополнительные эвристики.

Уменьшить частоту появления и интенсивность экстремальных ситуаций можно путем снижения "колебаний" в системе, которые распространяются через установленные связи. Это может быть достигнуто за счет увеличения "сопротивляемости" к колебаниям и разделения системы на зоны, которые в меньшей степени взаимосвязаны друг с другом, для того, чтобы предупредить распространение экстремальной ситуации по всей системе, как показано на рис. 3.

2. Инструменты управления сложной системой — адаптивное программное обеспечение управления сложной системой

Самоорганизация бизнес-процессов целесообразна только в том случае, если система в состоянии быстро принять решение, как реагировать на события, нарушающие нормальную работу. Принятое решение, равно как и сами действия, связанные с его выполнением, должны быть завершены до наступления следующего события.

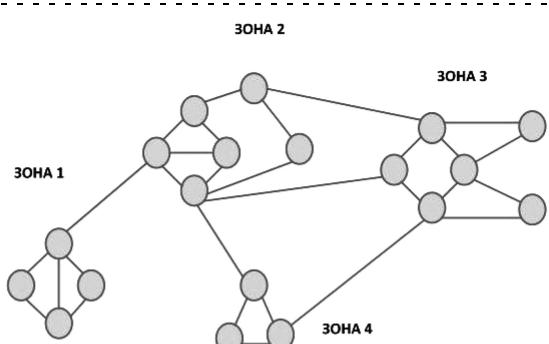
Приведем несколько примеров. В производстве машин частота возникновения непредвиденного события — 1 в 2 часа, в то время, как в процессе работы крупной фирмы — такси в столице (около 2000 автомобилей) — она же составляет единицы секунд. Очевидно, что человек не в состоянии реагировать на события с такой скоростью. Необходимо адаптивное программное обеспечение. Обычные программы не отличаются эффективностью в связи с тем, что при возникновении события, нарушающего нормальную работу, им необходимо перезапуститься, на что надо от 8 до 10 часов.

Для того чтобы обладать адаптивностью, программному обеспечению необходимо иметь подробную базу знаний и встроенный искусственный интеллект для поддержки принятия решений.

2.1. Сбор и организация знаний предметной области

Первый шаг при построении адаптивного программного обеспечения — собрать и организовать знания в предметной области решаемой проблемы.

Наиболее эффективный метод представления знаний — это сформировать сеть, в которой узлами будут являться классы объектов предметной области, а связями — классы отношений между ними. К примеру, для авиакомпаний важными объектными классами являются: Рейс, Пассажиры, Самолет, Пилот, Техобслуживание, Стоимость билетов, Маршрут и Сеть. Каждый объектный класс характеризуется определенными показателями и сценариями, описывающими их поведение. Подобное представление знаний в предметной области называется онтологией, которое представляется семантической сетью классов понятий и отношений.



Система разделена на зоны, в первую очередь, логически, затем географически

Рис. 3. Декомпозированная сложная система

2.2. Разработка виртуального мира

Следующий шаг — построить виртуальный мир, который способен отразить реальные ситуации (мир реальный). Виртуальный мир состоит из конкретных объектов, которые принадлежат к классам объектов из доменной онтологии и их отношений. Для авиакомпании виртуальный мир представляет собой сеть, узлами которой являются конкретные объекты, такие как: Пассажир П1, Пассажир П2...Рейс Ф1, Рейс Ф2...Место С1, Место С2...Самолет А1, Самолет А2... и т. д., а примерами отношений могут быть — "место С1 предназначено для пассажира П3", "Самолет А1 совершает Рейс Ф2" и т. д. Сложные системы, такие как цепь поставок крупных международных компаний, и представляющий их виртуальный мир могут включать в себя миллионы объектов, атрибутов, правил и отношений. Для того чтобы создать виртуальный мир для таких сложных систем, необходимы мощные мультиагентные программные средства.

2.3. Связь виртуального мира с реальным миром

Затем необходимо связать между собой реальный мир и мир виртуальный. Реальный мир (т. е. моделируемая сложная ситуация) постоянно меняется. Для авиакомпаний изменение представляет собой возникающее событие, к примеру: бронирование места, отправление рейса, задержка рейса, отмена рейса, закрытие воздушного пространства, поломка самолета и т. д.

Каждое новое событие в реальном мире должно немедленно привести к появлению аналогичного события в виртуальном мире. В результате та область, на которую повлияло возникшее событие, адаптируется в соответствии с изменениями реального мира. Любое изменение (адаптация) в виртуальном мире должно быть связано с реальным миром и реализовано до появления следующего события.

2.4. Предоставление возможности виртуальному миру управлять реальным миром

В итоге, виртуальный мир должен иметь возможность управлять реальным миром. Программный агент (небольшая компьютерная программа), который присутствует в каждом узле виртуального мира, предназначен сохранить целостность этого мира.

К примеру, если самолет в реальном мире сломался, агенты этого самолета в виртуальном мире рассылают сообщение агентам других узлов, на которые это событие может повлиять, о том, что данный самолет некоторое время не сможет летать. Данное сообщение активизирует соответствующие агенты, которые пытаются решить проблему путем замены сломанного самолета другим. Как только решение проблемы найдено, оно передается в реальный мир для выполнения, обеспечивая тем самым ко-эволюцию двух миров (рис. 4).

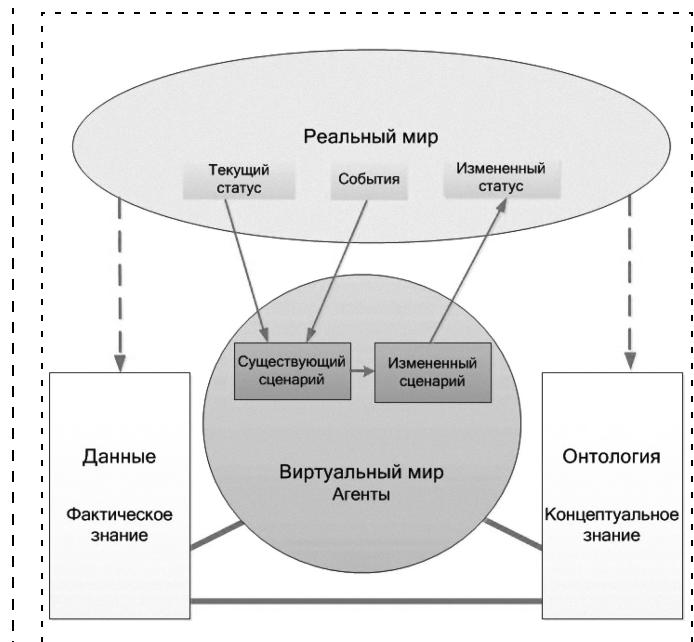


Рис. 4. Виртуальный мир управляет реальным миром

В настоящий момент единственной технологией, подходящей для создания сложного адаптивного программного обеспечения, является мультиагентная технология [9].

2.5. Сравнение мультиагентных систем с обычным программным обеспечением

Обычные программы последовательно распределяют ресурсы согласно заранее определенному алгоритму, поэтому при работе с большим количеством ресурсов и требований им требуется длительное время, чтобы найти оптимальное распределение ресурсов. Как только ресурсы или требования меняются, обычные программы запускают процесс распределения заново. При частом возникновении изменений системы начинают "колебаться" и вывают не в состоянии найти оптимального решения.

Централизованные интеллектуальные системы — более гибкие в силу того, что они обычно контролируются эвристиками (правилами, сформированными на основе опыта). Тем не менее, они решают проблемы последовательно и поэтому не способны эффективно справляться с частыми изменениями.

В отличие от вышеперечисленных программ мультиагентные системы (рис. 5) выполняют распределение ресурсов одновременно (квазипараллельно, с помощью автономного диспетчера). Как правило, сотни тысяч агентов, размещенных на одном сервере или рабочей станции, работают согласованно, и если проблема распространяется на большое число серверов и рабочих станций, то число согласованных распределительных процессов значительно увеличивается.

Это объясняет, как мультиагентные системы могут быстро выдать близкое к оптимальному рас-

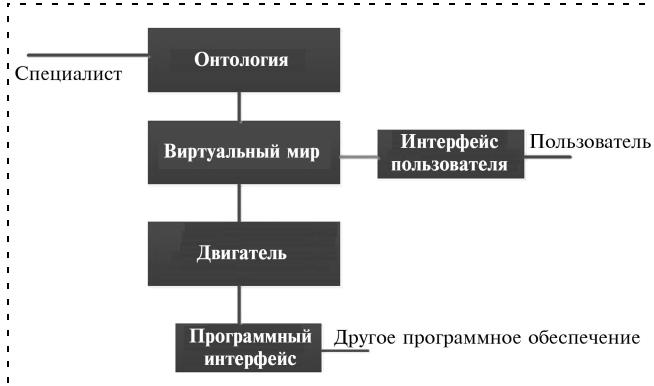


Рис. 5. Архитектура мультиагентной системы

пределение ресурсов в реальном времени. Если изменения возникают не часто, и существует возможность оптимально распределить ресурсы, агенты будут систематически пересматривать каждое установленное требование к ресурсу на предмет снижения общих издержек. Это длительный процесс, который агенты будут выполнять одновременно с любыми другими перераспределениями, связанными с изменениями на рынке. Агенты занимаются поиском решения проблемы 24 часа в сутки и частично пересматривают принятые решения до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение или пока не истечет время.

Агентам не нужны инструкции для того, чтобы начать действовать. Они планируют и выполняют задачи автоматически и способны самостоятельно принять решение, когда остановиться, а когда начать взаимодействие друг с другом. Они реагируют на любые изменения требований и поставок без эмоций и напоминания.

Агенты, ответственные за ресурсы, будут заранее их распределять, исследуя потенциальных клиентов, предлагая скидки, сопутствующие продажи, делая конкретные предложения и/или взаимодействуя с другими агентами. Агенты, ответственные за заказы клиентов, будут активно осуществлять поиск ресурсов, удовлетворяющих их требованиям, и сообщат клиентам или отправят им письмо по электронной почте, как только они обнаружат подходящее распределение.

3. Моделирование сложной системы

Только сложные модели могут быть использованы для моделирования сложных систем. Сложные системы меняются в процессе моделирования, и эти изменения должны отражаться в модели по мере поступления. Модели сложных систем должны иметь возможность адаптироваться к изменениям, и адаптация должна происходить автономно (без ожидания инструкций от проектировщика), что возможно только в том случае, если модели способны к самоорганизации. Другими словами, модели должны

быть способны ко-эволюционировать с ситуациями, которые они моделируют.

Основной смысл данного высказывания в том, что обычные иерархичные методы планирования не подходят для сложных ситуаций. Настоящее поколение компьютерных программ не может быть использовано для моделирования сложных ситуаций, поскольку они не адаптивные. Они не способны изменяться самостоятельно, для этого им необходима инструкция, написанная программистом. В настоящее время к адаптации способна только мультиагентная технология.

Сложность глобальных, до сих пор не решенных проблем (таких как глобальное потепление, нищета, рост популяции) настолько высока, что в лучшем случае мы можем рассчитывать лишь на создание существенно упрощенных моделей для этих проблем с целью выработать их способность к самовосстановлению в ответ на наши попытки их решить. Определим эти проблемы и связанные с ними сложные системы как *экстремально сложные*. Несмотря на то, что экстремально сложные системы чрезвычайно сложны, тем не менее, они могут быть успешно смоделированы. В качестве примера можно привести чрезвычайно удачный вариант моделирования роста населения [10].

Автор данной статьи изучает способы борьбы с бедностью путем моделирования "проблемы бедности" с использованием комплексных адаптивных программных моделей, а также занимается изучением общих причин, которые привели к возникновению глобального финансового кризиса, используя аналогичную технологию [11].

Существует также много других сложных проблем, где составные компоненты и их взаимодействие могут быть смоделированы и идентифицированы с помощью построения виртуального мира (модели), в общем такого же сложного, как и реальный мир. Практически все сложные бизнес-сituации, социальные, экономические, технологические проблемы и проблемы безопасности, так же, как и эволюцию городов, можно отнести к этой категории. Обозначим эту категорию как *сложные или крупномасштабные системы*.

Как только соответствующий виртуальный мир создается средствами адаптивного программного обеспечения, он может быть использован для моделирования поведения сложных систем в реальном мире в различных условиях, к примеру, для изучения поведения цепочки поставок с учетом изменяющихся рыночных условий [11].

4. Примеры коммерческого применения

За последнее десятилетие, с 1999 по 2009 гг., автор статьи и его партнер, Петр Скобелев, создали огромное число сложных адаптивных программных продуктов с использованием мультиагентной

технологии, которые получили свое коммерческое применение. Все эти системы имеют одну общую черту — они способны успешно решать проблемы, которые были расценены с точки зрения использования для их решения обычных широко распространенных методов и инструментов как слишком сложные.

В качестве примеров успешно созданных и внедренных сложных систем управления можно привести следующие:

1. Управление в реальном времени парком автомобилей такси (2000 машин) для транспортной компании в Лондоне [12].

2. Управление в реальном времени парком автомобилей для аренды для одной из наиболее крупных компаний по сдаче автомобилей в аренду [13].

3. Управление в реальном времени танкерами, перевозящими неочищенную нефть, объем перевозок которых составляет 10 % от всех перевозок мира, для компании по перевозке нефти в Лондоне [14].

4. Планирование в реальном времени крупного флота грузовиков, перевозящих груз по Великобритании [15, 16].

5. Мультиагентный семантический поиск аннотаций статей (в соответствии с информационными запросами) для научно-исследовательской лаборатории по составлению генетической карты в США [17].

6. Выявление правил и закономерностей в данных с использованием мультиагентной технологии распознавания для логистической компании в Великобритании [18].

7. Организация социальной поддержки населения на основе использования электронных идентификационных карт для крупного региона России.

8. Мультиагентная система моделирования аэропорта и полетов на основе датчиков RFID для обслуживания цепочек поставок, процесса транспортировки багажа и оформления пассажиров для исследовательской ассоциации в Германии.

9. Мультиагентная система клеш-анализа при проектировании крыла самолета для крупной авиакомпании в Европе.

5. Примеры применения в технике

Адаптивность — это ключевое свойство технических систем, работающих в условиях сложности, а наиболее эффективный способ сделать интеллектуальные продукты адаптивными — это сконструировать их как сложные системы [19]. Ниже приведены примеры проектов по проектированию и реализации сложных технических систем, в которых автор выступал в качестве инициатора или участника [20].

5.1. Система агентов, контролирующих механический станок

В данном проекте был разработан прототип системы в целях анализа пригодности сложных систем на производстве. Для начала были выбраны агенты, которые будут контролировать механический станок, в данном случае — простой металло режущий станок. Основным принципом стало закрепление одного агента за одной задачей, причем для выбранного станка были рассмотрены следующие задачи: контроль скорости обработки, планирование, мониторинг состояния, обеспечение охраны и безопасности, ведение документации и отчетов.

Таким образом, была сформирована команда из пяти агентов, описанных ниже. *Агенту, ответственному за производительность*, была дана задача выбрать и обеспечить оптимальную скорость обработки. *Агенту, ответственному за материально-техническое обеспечение*, была дана задача отследить условия работы станка. В случае возникновения поломки агент, ответственный за материально-техническое обеспечение, должен был начать переговоры с агентом, ответственным за производительность, с целью завершить, приостановить процесс производства или продолжить его, заменить станок на другой на некоторое время в зависимости от того, насколько серьезна поломка.

Агент, ответственный за программирование, "обсуждал" загрузку станка с другими агентами на условиях аукциона, в котором мощность станка сопоставлялась с объемом заказов. *Агент, ответственный за безопасность*, отслеживал окружающую обстановку с целью не допустить появления рабочих и роботов в зоне опасности. *Агент, ответственный за хранение документации*, сохранял и отправлял отчеты о работе станка.

База знаний системы содержала до 10 правил для каждого агента и базу истинных фактов. К примеру, данные, предназначенные для агента, ответственного за производительность, содержали инструкцию по выбору металла и режима обработки выбранного металла. Данные агента материально-технического обеспечения включали в себя подробное описание возможных поломок станка и вероятность того, что они приведут станок в неисправное состояние.

Данный пример показал возможность создания мультиагентной системы, которая была бы простой для разработки и весьма гибкой. Но что еще более важно, группа из пяти агентов ясно продемонстрировала эмерджентное поведение, более сложное, чем поведение каждого агента в отдельности, не говоря о том, что система функционировала без единого управляющего центра.

5.2. Интеллектуальная геометрия компрессора

Оевые турбокомпрессоры широко используются в промышленности для сжатия и продвижения воздуха, к примеру, в реактивных двигателях. Работа всех турбокомпрессоров ограничена возможностью возникновения аэродинамических процессов, таких как помпаж или пульсирующий поток. Это означает, что иногда поток газа становится нестабильным и может поменять свое направление. Данные процессы могут привести к серьезным повреждениям двигателя. Современные осевые компрессоры содержат роторные и статорные лопатки, геометрия которых неизменна, исключение составляет только угол наклона лопатки, величина которого может незначительно отличаться от заданной нормы. Как правило, режим работы компрессора направлен на то, чтобы установить его работу вдали от линии помпажа, таким образом не допуская возможности возникновения пульсирующего потока и помпажа во время работы двигателя.

Для того чтобы снизить предел прочности компрессора без повреждения самого компрессора, была разработана его модель с изменяющейся геометрией, в которой интеллектуальные агенты каждого движущегося компонента проводят переговоры на предмет поиска оптимальной геометрии в условиях постоянно меняющихся аэродинамических условий. Функционирование компрессора в целом определяется в результате взаимодействия агентов.

Имитационные эксперименты доказали, что новая функциональность позволяет модели компрессора быть способной к самоорганизации, а именно при изменении аэродинамических условий всегда обеспечивать оптимальный или близкий к оптимальному коэффициент полезного действия [20]. Используя встроенные вычислительные мощности, можно встроить в компрессор способность к самодиагностике (к отслеживанию работы компрессора и распознаванию ошибок по мере их поступления), к самовосстановлению с помощью перепланирования (устранение неисправных деталей и их обезвреживание), а также путем постепенного снижения интенсивности работы (например, за счет переустановки сохранившихся исправных частей с целью достичь сниженного, но приемлемого уровня работы).

5.3. Всемирная логистическая сеть

Мировая экономика характеризуется часто изменяющимся спросом, который оказывает значительное влияние на производителей продукции, распространяющих свою продукцию по всему миру. Доставка груза по воздуху, аренда автомобильного транспорта, аренда склада, отслеживание движения груза и оборудования, доставка груза в назначенный срок в пункт назначения — это все бизнес-процессы, выполнить которые на данный момент сложнее, чем когда-либо. Даже в рамках одного производст-

венного предприятия логистические процессы становятся чрезвычайно сложными, особенно в случае, если требования клиента постоянно меняются.

Возможное решение данной проблемы — это обрабатывать всю транспортную систему целиком. Поставщики и перевозчики могут вести торги, предлагая и обсуждая разные возможности перевозки. Как только транспортное средство полностью загружено, поставщики отправляют поток интеллектуальных посылок в обменные пункты мировой логистической сети. Каждая посылка будет иметь встроенный в упаковочный материал чип с интеллектуальным агентом. Данный агент будет сообщать о месте ее прибытия, ожидаемом времени прибытия, маршруте транспортирования, условиях хранения и перевозки, весе и габаритных размерах.

Каждый элемент мировой логистической сети (склады, перевозчики и обменные пункты) будет иметь постоянных интеллектуальных агентов, способных сообщаться с интеллектуальными агентами посылок. В силу того, что они транспортируются по мировой логистической сети, агенты посылок будут регулярно обновлять данные об их месте и времени прибытия. Как только появляется новый пункт назначения, агенты посылки и агенты мировой логистической сети будут "примерять" новые каналы по всей сети для каждой отдельной посылки. При необходимости агенты посылки могут спровоцировать покупку дополнительного транспорта, которое необходимо для того, чтобы завершить поставку. Агенты будут способны принять поставку, не прибегая к помощи владельца посылки.

Данный сценарий рассматривает развитие действительно распределенных, самоорганизованных логистических сетей, предлагающих снижение стоимости и длительности перевозок. Он также в состоянии предложить решение проблемы загрязнения окружающей среды в настоящее время, связанное с увеличением транспортных перевозок по всему миру. Современный прототип подобной системы может быть разработан в течение одного года. Дальнейшие разработки будут проводиться поэтапно. Соответствующие интеллектуальные склады, перевозчики и обменные пункты могут быть добавлены к сети в требуемой форме и когда это будет необходимо. Идея в целом может применяться для интеллектуальной маркировки и взимания средств за доставку товара в розницу.

5.4. Семейство интеллектуальных космических роботов

Несмотря на то, что попытки Великобритании изучить космическое пространство свелись практически к нулю, некоторые средства на инновационные исследования космического пространства все же выделяются. Так, несколько лет назад был начат проект, направленный на обеспечение автономности и надежности в космическом пространстве, в кото-

ром были задействованы три университета и два аэрокосмических предприятия. Задача состояла в разработке прототипа робота для исследования Марса.

Основываясь на принципах управления сложными системами, описанных в данной статье, было предложено решение, согласно которому один робот был заменен на семейство, состоящее из пяти небольших роботов. Каждый из этих роботов обладал ограниченным интеллектом и мог выполнять простейшие задачи, такие как размещение научных инструментов. Кроме этого, он мог оказывать ряд услуг другим роботам — членам команды, к примеру, проводить чистку их фотоэлемента, если он покрылся космической пылью и оказывать помощь при выходе из глубоких трещин.

Стоимость работы и вес каждого робота этого семейства были гораздо ниже стоимости работы и веса равнозначного единичного робота. Размер роботов является их очень важным преимуществом при их упаковке для запуска в космос и возвращения обратно.

5.5. Парк сельскохозяйственных машин

На сегодняшний день сельскохозяйственная техника слишком массивна и дорога. В силу того, что техника слишком тяжелая, она разрушает почву, на восстановление которой требуется большое количество средств. В то же время она еще и дорогостоящая, поэтому ее могут позволить себе только крупные сельскохозяйственные предприятия. Согласно оценочным показателям, сделанным сельскохозяйственными специалистами, практически половина всего веса трактора и половина его стоимости приходится на кабину и соответствующее оборудование, единственное предназначение которых защищить рабочих и обеспечить им комфортные условия работы. При этом рабочие не удовлетворены условиями работы, в первую очередь, потому что им скучно.

Очевидно, что применение новых технологий может позволить заменить тяжеловесную технику парком небольших подвижных сельскохозяйственных машин, оборудованных сенсорами и гидроусилителями, и контролируемыми агентами сетей, поведение которых ничем не будет отличаться от поведения муравьев. В силу универсальности этого оборудования оно может быть использовано как для работы на небольших, так и на огромных полях. Кроме этого, такой подход позволит развиваться малому фермерству, которое наносит меньшие вреда окружающей среде.

6. Моделирование чрезвычайно сложных систем

Среди всех классов проектов, возможно, наиболее интересным является внедрение в разработку устойчивых мировых финансовых систем [8]. Согласно анализу, представленному в данной статье, совре-

менная мировая финансовая сеть имеет следующие системные недостатки:

- правила принятия решений в финансовых организациях — слишком жесткие и не обладают достаточной гибкостью во время кризиса, чтобы найти выходы из критических ситуаций и стабилизировать процессы;
- чрезвычайно высокая скорость проведения финансовых транзакций и тесная взаимосвязанность финансовых организаций повышает риск нестабильности и может стать причиной возникновения критических ситуаций.

Решение данных проблем включает в себя:

- разделение сектора на некоторое число логистических регионов для того, чтобы снизить риск распространения экстремальных ситуаций по всей глобальной системе;
- развитие онтологии финансовых услуг для каждого региона путем внедрения наиболее успешных примеров в банках, капиталовложениях, финансовой торговле, но с учетом особенностей региона;
- разработку набора мультиагентных симуляторов, которые будут постоянно оценивать работу как региональных систем, так и работу финансовых систем в целом;
- разработку интеллектуальных систем, возможно, отличающихся для разных регионов, но постоянно оценивающих работу систем.

Данные выводы были сделаны в большей степени на основе аналогии, чем на основе непосредственного исследования финансовых систем, поэтому они являются предварительными. Однако изучение мировых финансовых систем с точки зрения теории сложных систем, скорее всего, приведет к похожим результатам.

Теория сложных систем была также использована для изучения эволюции английского языка. Язык постоянно меняется, но данные изменения

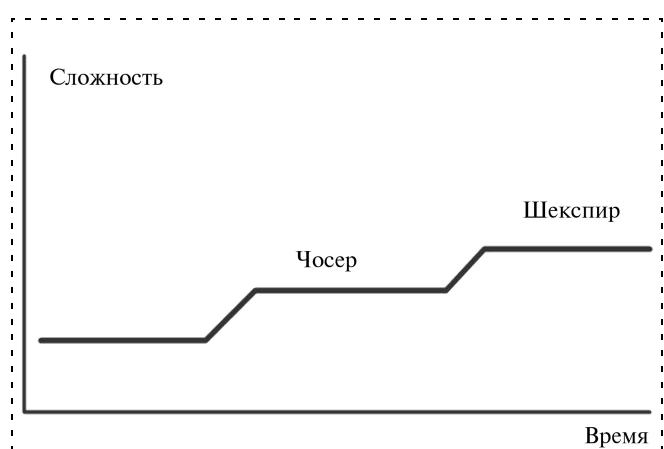


Рис. 6. Влияние Чосера и Шекспира на английский язык

незначительны по сравнению с двумя этапами, которые возникли благодаря Чосеру и позже Шекспиру, которые внесли серьезные изменения в язык, показанные на рис. 6.

Благодарности

В 1990 г., будучи профессором на кафедре Конструирования и инноваций в Открытом университете в Великобритании, а также руководителем Центра по конструированию интеллектуальных систем, я был приглашен профессором Владимиром Андреевичем Виттихом прочесть курс лекций о мультиагентных технологиях в Самаре (Россия). Мой визит зародил долгосрочное сотрудничество с Владимиром Андреевичем Виттихом и Петром Олеговичем Скобелевым, талантливым исследователем и разработчиком программного обеспечения, посещавшим мои лекции. Совместно с Петром Олеговичем, которому выражают благодарность как постоянному партнеру, мы основали и возглавили несколько коммерческих компаний в Лондоне, которые занимаются разработкой многих проектов, описанных в данной статье. Выражают особую благодарность Владимиру Андреевичу Виттиху за огромное число научных идей, с которыми он поделился в течение нашего долгого плодотворного сотрудничества и впоследствии дружбы.

Заключение

Мы живем и работаем в сложном мире, сложность которого постоянно растет. Настоящие математические методы и обычное программное обеспечение не способны моделировать сложные ситуации, которые характеризуются большим числом составных компонентов, высокой степенью непредсказуемости, возникновением непредвиденных экстремальных ситуаций.

За последние десять лет автор статьи и его партнеры разработали простую и практическую методологию для управления сложными ситуациями. Методология обеспечивается за счет мощных инструментов на основе мультиагентных технологий, которые демонстрируют искусственный интеллект и способность быстро принимать независимые решения в реальном времени. Широкий спектр областей применения методологии (техника, коммерция) подтверждает ее мощность.

Список литературы

1. Prigogine I. Is Future Given? World Scientific Publishing Co, 2003.
2. Prigogine I. The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature. Free Press, 1997.
3. Holland J. Emergence: from Chaos to Order. Oxford University Press, 1998.
4. Beinhocker E. The Origin of Wealth: Evolution, Complexity and the Radical Remaking of Economics. Random House Business Books, 2007.
5. Taleb N. N. The Black Swan. Penguin Books, 2008.
6. Kuhn T. The Structure of Scientific Revolutions. Second Edition. Enlarged, University of Chicago Press, 1970.
7. Rzevski G., Skobelev P. Emergent Intelligence in Large Scale Multi-Agent Systems // International Journal of Education and Information Technology. 2007. Issue 2. Vol. 1. P. 64–71.
8. Rzevski G. Using Tools of Complexity Science to Diagnose the Current Financial Crisis // Optoelectronics, Instrumentation and Data processing, 210. 2010. Vol. 46. N 2.
9. Rzevski G., Skobelev P., Andreev V. Magenta Toolkit: A Set of Multi-Agent Tools for Developing Adaptive Real-Time Applications / In Marik V., Vyatkin V., Colombo A. W. (eds.) // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Third Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, Holomas 2007, Regensburg, Germany. Springer LNAI 4659, 2007. P. 303–314.
10. Kapitza S. Global Population Blow-Up and After: The Demographic Revolution and Information Society // Report to the Club of Rome. 2006.
11. Rzevski G., Skobelev P., Batishchev S., Orlov A. A Framework for Multi-Agent Modelling of Virtual Organisations / In Camarinha-Matos L. M. and Afsarmanesh H. (eds.) // Proc. and foundations for Virtual Organisations, Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 253–260.
12. Glaschenko A., Ivashenko A., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Real-Time Scheduling System for Taxi Companies // Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.). Budapest, Hungary, May, 2009. P. 10–15.
13. Andreev S., Rzevski G., Shveykin P., Skobelev P., Yankov I. Multi-Agent Scheduler for Rent-a-Car Companies // Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009), Decker, Sichman, Sierra and Castelfranchi (eds.). Hungary, Budapest, May, 2009. P. 10–15.
14. Rzevski G. On conceptual Design of Intelligent Mechatronic Systems // Mechatronics. 2003. 13. P. 1029–1104.
15. Rzevski G., Himoff J., Skobelev P. Magenta Technology: A Family of Multi-Agent Intelligent Scheduler // Workshop on Software Agents in Information Systems and Industrial Applications (SAISIA). Fraunhofer IITB, 2006.
16. Andreev M., Rzevski G., Skobelev P., Shveykin P., Tsarev A., Tugashev A. Adaptive Planning for Supply Chain Networks / In Marik V., Vyatkin V., Colombo A. W. (eds.) // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Third International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, Holomas. Regensburg, Germany, Springer LNAI 4659, 2007. P. 215–225.
17. Rzevski G., Skobelev P. Agent Based Semantic Web. Semantic Universe Website, 2009.
18. Rzevski G., Skobelev P., Minakov I., Volman S. Dynamic Pattern Discovery using Multi-Agent Technology // Proceedings of the MATH, SIP, TELE-INFO Conferences in Dallas, 2007.
19. Rzevski G. Using Complexity Science Framework and Multi-Agent Technology in Design / In Alexiou K., Johnson J., Zamenopoulos T. (eds.), Embracing Complexity in Design // Routledge, 2010.
20. Rzevski G., Skobelev P., Batishchev S., Orlov A. A Framework for Multi-Agent Modelling of Virtual Organisations / In Camarinha-Matos L. M. and Afsarmanesh H. (eds.) // Processes and foundations for Virtual Organisations, Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 253–260.

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Институт проблем управления
сложными системами РАН,
Президент/Генеральный конструктор,
Группа компаний "Генезис знаний"
petr.skobelev@gmail.com

Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем

Представлены мультиагентные технологии и прикладные системы, разработанные в Самарской научной школе мультиагентных технологий. Показываются основные особенности разработанных систем, развивающих подход Swarm Intelligence, которые связаны с использованием механизмов самоорганизации и эволюции, присущих живым организмам. Рассматриваются промышленные системы для управления мобильными ресурсами, понимания текстов, извлечения знаний и др.

Ключевые слова: мультиагентный подход, самоорганизация и эволюция, коллективный интеллект, управление ресурсами, понимание текста, кластеризация, промышленные применения

Введение

Научные и практические основы мультиагентного подхода к решению сложных задач и построению распределенных систем начали складываться в последние десятилетия прошлого века на стыке направлений по искусственному интеллекту, объектно-ориентированному и параллельному программированию, Интернет-технологиям и телекоммуникациям [1–5].

На сайте Ассоциации AgentLink Европейского союза [6], объединяющей разработчиков мультиагентных систем (МАС), представлен план (дорожная карта) развития этого направления до 2020–2030 гг., имеющий девиз "Вычисления как взаимодействия" (Computing as Interactions). Этот девиз выражает важную суть данной технологии, позволяющей от централизованных, монолитных и последовательных программ с заранее фиксированной структурой перейти к распределенным сообществам автономных программ, работающих асинхронно и квазипараллельно, способных самостоятельно формировать требуемые структуры и взаимодействовать для решения поставленных задач.

Актуальность и значимость создания МАС в современном все более сложном и быстро меняющемся мире трудно переоценить. В подтверждение этой мысли можно привести впечатляющую статистику роста интереса научного сообщества к указан-

ной тематике. Если в конце 80-х — начале 90-х годов международные семинары по МАС собирали по 25...30 исследователей из 5...7 развитых стран, то в последнее время ситуация кардинально изменилась. Например, в работе прошедшего в прошлом году Всемирного конгресса Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS-2009) принимали участие более 600 делегатов из 45 стран, представлявших результаты в области логики рассуждений агентов, методов представления знаний, платформ для мультиагентных решений, а также прикладных систем в диапазоне от моделирования социальных процессов до управления роботами. Однако, если число научных работ в этой области стремительно растет, то с коммерциализацией научных разработок и практическими применениями мультиагентных технологий дело обстоит гораздо скромнее, несмотря на тот факт, что на сегодня хорошо известно более 25 коммерческих компаний и 100 университетских проектов в этой области разработок.

Причины этой ситуации состоят в том, что рассматриваемые системы, отвечая новым вызовам глобальной экономики и информационного общества, во многом меняют саму парадигму современного программирования, формируя новые постановки задач и требуя разработки принципиально новых методов и средств решения этих задач для практических применений.

Несмотря на эти трудности, в мире уже известен целый ряд успешных промышленных МАС-проектов в диапазоне от управления логистикой боя и миниатюрными беспилотными самолетами до управления коттеджами для экономного расходования энергии. Список коммерческих компаний, активно разрабатывающих и применяющих МАС, начал заметно расти уже на рубеже столетий: LostWax (Великобритания) — 1996 [7], Whitespace Technology / Living Systems (Швейцария) — 1999 [8], NuTech Solution (США) — 1999 [9] и т. д.

В число этих компаний, по данным Ассоциации AgentLink [6], входит и англо-российская компания Magenta Technology [10], соучредителями которой стали профессор Открытого университета (Великобритания) Г. А. Ржевский и автор настоящей статьи. Данная компания была создана в 1999 г. на базе научно-производственной компании "Генезис знаний" и за последние 10 лет приобрела ценный опыт масштабных промышленных разработок мультиагентных систем, пройдя путь от группы энтузиастов в несколько человек до коллектива из 180 высококвалифицированных программистов.

Полученные результаты во многом базируются на исследованиях в области теории управления, проводившихся в Институте проблем управления сложными системами РАН (ИПУСС РАН) под руководством проф. В. А. Виттиха, без личной под-

держки и творческого участия которого эти работы не получили бы своего развития.

С учетом быстро растущего интереса к мультиагентным технологиям, открывающим широкие перспективы для создания интеллектуальных систем нового поколения, и был подготовлен настоящий краткий обзор истории и основных результатов разработок, выполненных в Самарской школе МАС за прошедшие годы.

Надеемся, что предлагаемая статья будет способствовать развитию данного направления в нашей стране и появлению новых промышленных мультиагентных систем для различных применений.

Автор выражает благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках гранта № 10-08-01015а.

1. Теоретические основы разработки мультиагентных систем: от Swarm Intelligence — к Emergent Intelligence

Днем рождения Самарской научной школы мультиагентных систем можно считать 15 июня 1990 г., когда в бывшем Самарском филиале Института машиноведения РАН (СФ ИМАШ), а ныне Институте проблем управления сложными системами РАН (ИПУСС РАН) с циклом лекций о новой глобальной экономике реального времени, современной теории сложности и мультиагентных системах как новой парадигме решения сложных задач выступил проф. Г. А. Ржевский (Открытый университет, г. Лондон, Великобритания), приехавший в Самару по приглашению д-ра техн. наук, профессора В. А. Виттиха, в то время директора СФ ИМАШ (ныне ИПУСС РАН).

Цикл этих увлекательных, ярких и новаторских лекций во многом стал отправной точкой для начала многолетнего творческого сотрудничества ученых Лондона и Самары и становления в Самаре нового научного направления, проведения целого ряда пионерских НИР и ОКР в области МАС, а потом и создания первых промышленных приложений.

В то время основным направлением разработок в мультиагентных системах были приложения для e-коммерции в сети Интернет. Считалось, что программные агенты быстро станут "виртуальными личностями", обладающими развитыми механизмами сознания и мышления, включая встроенную индуктивную или дедуктивную машину для рассуждений (например, на основе Пролога), различными средствами извлечения знаний и обучения, взаимодействия с пользователем и т. д. В сфере мультиагентных приложений для решения сложных задач, например оптимизации ресурсов, доминировали классические алгоритмы, реализуемые на базе известных методов комбинаторного перебора, например, метода ветвей и границ.

Основой наших разработок с самого начала стал "биологический" подход (bio-inspired), получивший название "Интеллекта роя" ("Swarm Intelligence"), изначально нацеленный на создание мультиагентных систем нового класса, использующих принципы самоорганизации и эволюции, характерные для поведения живых систем, например, колонии муравьев или роя пчел [11].

Решение любой сложной задачи в таких системах формируется эволюционным путем, часто методом "проб и ошибок", за счет взаимодействия большого числа (десятков и сотен тысяч) простых агентов, непрерывно кооперирующих и конкурирующих друг с другом. Уже в первых работах по этому направлению было показано [11], что данный подход позволяет решать задачи самой высокой сложности, не поддающиеся решению другими способами, например, в области планирования и оптимизации ресурсов, распознавания образов, понимания текстов и ряда других.

Например, при решении таким методом сложных задач оптимизации программные агенты моделируют поведение колонии муравьев в поисках корма — соответствующий подход получил название Ant Optimization [12]. Агенты-исследователи сначала случайным образом разбегаются от гнезда и независимо исследуют окружающую среду, представляющую собой пространство решений. Однако по мере достижения результата успешные особи, возвращаясь к гнезду с добычей, оставляют следы, которые улавливают другие члены колонии, что заставляет их координировать свое поведение и выбирать тот же путь, направляясь к тому же источнику корма. Если корма много, то все больше муравьев (агентов) обращается к данному источнику, усиливая "протаптывание" дорожки, которая, в свою очередь, привлекает все больше муравьев, и, наоборот, по мере уменьшения корма, привлекательность дорожки ослабевает, и начинают набирать конкурирующую силу другие "дорожки", в это время случайно найденные другими муравьями. В этом случае решение сложной задачи (оптимизации, кластеризации, распознавания образов и т. д.) находится даже в тех случаях, когда другие классические математические методы не работают вовсе, но для построения такого решения может потребоваться довольно много времени для реализации различных "попыток", получение результата иногда никак не гарантировано, и данный подход трудно применим в реальном времени.

Вместе с тем, сильные стороны этого подхода связаны с возможностью решения сложных задач за счет взаимодействия большого числа простых агентов, конкуренции агентов, реализующих различные методы "проб и ошибок", а также с эволюционным решением задач, в котором существует возможность пересматривать решения, и с наличием

общего поля памяти, корректируемого в ходе различных попыток, как инструмента простейшего согласования действий агентов.

Кроме того, стало очевидно, что Swarm Intelligence — важная альтернатива принятому в области искусственного интеллекта классическому пониманию интеллектуальной системы. В этом понимании интеллект должен прийти от механической сборки блоков (как при сборке автомобиля), отвечающих за память, сознание, разные виды рассуждений и т. д. Интеллект же в Swarm Intelligence не находится ни в одном блоке, а рождается как свойство системы в результате взаимодействия большого числа совершенно не интеллектуальных элементов. Факт, что умственные возможности одного муравья или пчелы относительно малы, но рой пчел или колония муравьев представляют собой мощный организм с высокой степенью интеллекта, позволяющей защищать гнездо, осваивать новые территории, находить пропитание и решать многие другие задачи в условиях постоянно изменяющихся ситуаций в среде.

Важный шаг в развитии этого направления исследований был сделан в работах Артура Кестлера в рамках предложенной им концепции холонических систем [13], первая реализация которых в системе PROSA была выполнена в работах Хенрика Ван Брюсселя, Поля Валкенаерса и ряда других авторов из Христианского университета (Бельгия) [14].

В холоническом подходе вводится понятие холона как основы для построения сложных сетевых структур элементов, поскольку холон сочетает в себе свойства как целого, так и части. Иными словами, холон может являться как простейшим элементом, так и составным, причем элементы сложного составного холона могут входить в другие холоны, представляя собой фактически многоуровневую сеть любых сущностей, позволяющую моделировать как иерархии, так и анархии элементов, а также различные промежуточные классы сетей, например, холархии как иерархии холонов.

При создании мультиагентных систем для производства выделяются агенты заказа, продукта, ресурса, а также штабной агент, позволяющий хранить общее для всех знание об особенностях производства, оказывать консультации и задавать стратегии другим агентам.

Холонический подход был успешно развит для создания муль-

тиагентных систем управления промышленным производством в работах под руководством профессора В. Марека из Технического университета г. Прага (Чехия) [15]. Этот подход применялся при создании систем управления производством для концерна Skoda, автоматизации управления для подводных лодок по заказу Rockwell International, управления роем беспилотных самолетов в интересах Министерства обороны США и в ряде других приложений. Работы в этом направлении велись под руководством профессора П. Лейта в Политехническом институте Браганки (Португалия), где применялись, в частности, при создании системы АДАКОР для контроля производства продукции [16].

Динамичное развитие данного направления привело к появлению ставшей уже регулярной международной конференции по холоническим и мультиагентным системам в промышленном производстве — International Conference on Holonic and Multi-Agent Systems in Manufacturing (Holomas).

Важные результаты рассмотренных исследований состояли в том, что были введены базовые классы агентов и протоколы их переговоров, показаны преимущества сочетания конкуренции и кооперации агентов, предложены сетевые структуры для организации взаимодействия агентов.

В развитие данного направления в разработанном нами подходе были выделены ключевые свойства мультиагентных систем для промышленных применений, представленные на рис. 1.

Традиционные системы

- Иерархии больших программ
- Последовательное выполнение операций
- Инструкции сверху вниз
- Централизованные решения
- Управляются данными
- Предсказуемость
- Стабильность
- Стремление уменьшать сложность
- Тотальный контроль

Мультиагентные системы

- Большие сети малых агентов
- Параллельное выполнение операций
- Переговоры равных сторон
- Распределённые решения
- Управляются знаниями
- Самоорганизация
- Эволюция
- Стремление наращивать сложность
- Создание условий для развития

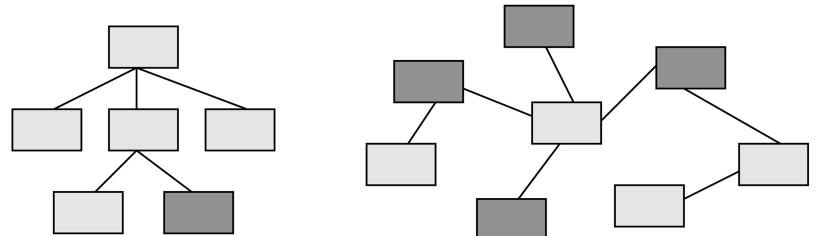


Рис. 1. Отличительные особенности разрабатываемых мультиагентных систем

Было предложено создавать мультиагентные системы в виде множества работающих асинхронно (квазипараллельно) со-программ, представляющих собой "легких" агентов, использующих онтологию как представления знаний предметной области и общую память объектов данных (сцену), отражающих текущую ситуацию во внешней среде, а также формирующих сети связей в ходе прямых переговоров, для чего потребовалось создавать собственную платформу как надстройку над операционной системой.

Для реализации мультиагентного подхода программные агенты должны обладать следующими важными способностями:

- автономно существовать в программной среде, т. е. агент не может быть "вызван" как обычный "метод" в объектном программировании, а должен иметь свое состояние, постоянно функционировать в среде и демонстрировать целенаправленное поведение. Такого агента нельзя "заставить" что-то делать, но его можно "попросить" выполнить какую-то задачу, при этом он может как принять, так и отклонить это предложение в зависимости от своих целей, текущего состояния и активных сценариев работы, например, взятых ранее обязательств перед другими агентами, а также полученных результатов — иначе может не выполнить свои обязательства;
- реагировать на события и принимать или пересматривать свои решения, для чего намечать цели, выбирать и применять доступные сценарии действий для получения требуемого результата (в будущем — синтезировать такие сценарии). При этом в любой момент времени агент должен уметь прерывать выполняемые сценарии, воспринимать информацию и реагировать на сигналы из среды, и, соответственно, откладывать старые и выбирать новые сценарии поведения, исполнять намеченные планы, анализировать результат и сравнивать с ожидаемыми, наконец, изменять поведение в случае расхождения плана и факта;
- коммуницировать с другими агентами (вести переговоры), причем как косвенно взаимодействовать (например, через передачу сигналов в среде, по образу ферромонов у насекомых), так и вести прямые переговоры с другими агентами, например, задавая вопросы другим агентам, информируя их об изменениях своего состояния (или планов действия), делая предложения другим агентам, подтверждая согласие или несогласие с предложениями других агентов, формируя встречные предложения и находя компромисс и т. д.

Рассмотренные особенности отличают разработанную платформу от таких известных платформ, как JADE, Cougaar, Agent Builder, JACK и других,

использующих разные нити для работы каждого агента, что приводит к существенному замедлению работы системы.

Достоинством такого подхода является возможность решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени, а также большая открытость, гибкость и оперативность, производительность и живучесть создаваемых систем, находящих все большее применение в разных сферах.

В этом случае МАС, состоящая из большого числа даже крайне простых агентов, неожиданно (поскольку не содержит специальных встроенных блоков "интеллекта", например специальных методов рассуждений) оказывается способна демонстрировать необычно сложное поведение, что выражается в возникающей спонтанно, в заранее непредвиденный момент времени цепочке связанных пересмотров состояний различными агентами [17].

Именно это направление разработок, в последнее время все чаще называемое *Emergent Intelligence* ("спонтанно возникающий интеллект"), стало основным в работах Самарской научной школы мультиагентных систем, главной отличительной чертой которой с первых шагов стала практическая направленность на создание промышленных мультиагентных систем и разработка совершенно новых методов и средств решения сложных задач, основанных на принципах самоорганизации и эволюции.

2. Сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени

2.1. Базовые классы агентов ПВ-сети

Одной из важных задач применения разработанных мультиагентных технологий стала задача распределения, планирования и оптимизации ресурсов в реальном времени, представляющая собой характерный пример сложных и динамичных задач, которые плохо решаются или вовсе не решаются традиционными математическими методами и средствами, характеризуются наличием высокой степени неопределенности, должны работать в условиях постоянно изменяющейся ситуации, плохо структурируются и формализуются, часто имеют на входе ошибочные данные и т. д.

В разработанном нами подходе [18—20] было предложено создавать сети потребностей и возможностей (ПВ-сети), в которых выделяются агенты (роли) потребностей и возможностей, по определению представляющих собой сущности с противоположными интересами, которые действуют в рамках виртуального рынка системы на основе экономических рассуждений и могут как конкурировать, так и кооперироваться друг с другом.

При этом ПВ-сеть формируется потребностями и возможностями ее элементов, в простейшем слу-

чае — заказов и ресурсов, постоянно стремящихся найти друг друга и установить связи.

Роль потребности несет в себе знание "идеала" (будущего), а роль возможности — знание "реальности" (прошлого). Так, каждый грузовик в мультиагентной системе управления перевозками знает, каков был его маршрут, где сейчас он находится, каким грузом он загружен и т. д. Получая предложения от разных грузовиков, заказ может решить, какой из них ему лучше всего подходит. Но, с другой стороны, и сам грузовик может породить новую "потребность", определяя (специфицируя), какие именно заказы ему нужны в текущий момент времени, чтобы быть полностью загруженным.

В более сложном мире грузовых перевозок модель ПВ-сети может учитывать потребности и возможности клиентов и заказов, грузовиков и грузов, маршрутов поездок, магазинов и складов, водителей, станций заправок и т. д. При этом заказ постоянно ищет себе лучший грузовик, а грузовик встречено — заказ, но также маршрут и водителя и т. п.

Сложность модели ПВ-сети реальной транспортной сети может наращиваться как введением новых классов агентов, представляющих интересы различных физических и абстрактных сущностей, необходимых для работы каждой сети, так и увеличением числа и разнообразия классов протоколов взаимодействий между агентами разных классов.

Для реализации мультиагентных систем на основе концепции ПВ-сетей был разработан специализированный набор компонентов инструментальной платформы [21—24].

При этом используются ключевые принципы холонического подхода, поскольку каждый из агентов может входить в сообщество агентов (холон, группу, организацию) или в любой момент покидать это сообщество, если он не удовлетворен условиями своего пребывания. Например, группа агентов заказов на перевозку грузов, размещенных на борту одного грузовика, может иметь общие интересы, которые выражает агент маршрута, при нарушении которых любой из заказов может покидать один грузовик и уходить на другой грузовик.

Такой подход позволяет примирить эгоистичные интересы отдельных агентов виртуального рынка с интересами групп агентов, используя единые принципы самоорганизации и эволюции на разных уровнях системы.

2.2. Виртуальный рынок ПВ-сети

Основой взаимодействия рассмотренных агентов становится общий виртуальный рынок, на котором агенты могут покупать или продавать свои сервисы, исходя из экономической целесообразности (рис. 2).

Постоянная активность всех агентов сети, причем со стороны как потребностей, так и возможностей, вызывает многосторонние переговоры на виртуальном рынке, идущие квазипараллельно [24]. При этом каждый агент рассматривается как машина состояний, возвращающая управление диспетчеру после каждого такта переговоров. Каждый агент постоянно старается добиться своей цели и для этого вступает в отношения (связи) с другими агентами (заказ бронируется на грузовик, грузовик — на водителя и т. д.), устанавливаемые в сцене, которые могут пересматриваться агентами в результате выявления и разрешения конфликтов под действием приходящих извне или генерируемых внутри системы событий. Принятие решений несколькиими агентами и установление связей между ними для решения задач, непрерывно возникающих при поступлении каждого нового события, вызывает изменение условий функционирования для других агентов и тем самым определяет процесс самоорганизации системы, приводящей к перестройке расписания в ответ на события.

Таким образом, ПВ-сеть заказов и ресурсов отражает постоянно изменяющееся и никогда не останавливающееся ("живое") расписание, являя собой пример самоорганизующейся системы, адаптирующей свое поведение под действием событий, происходящих в реальном времени.

Правила принятия решений агентами на виртуальном рынке определяются моделью микроэкономики ПВ-сети, определяющей стоимость сервисов, систему штрафов и бонусов, как агенты делят прибыль, какие налоги и при каких действиях должны платить и т. п.

Все это призвано дать агентам возможность накапливать виртуальные деньги, играющие роль энергии в системе, и использовать их для формирования новых или поддержания существующих связей.

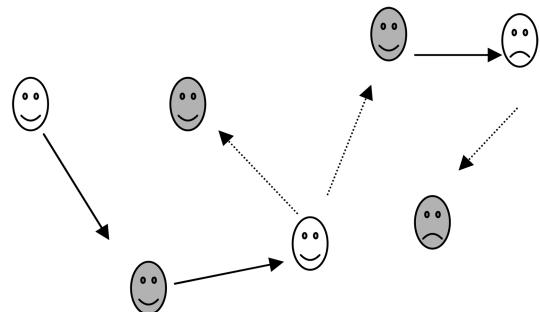


Рис. 2. Сцена виртуального рынка: поиск агентов потребностей (белые) и возможностей (серые), показан различный уровень удовлетворенности связями и разные виды связей (предварительное бронирование и т. д.)

2.3. Архитектура МАС для реализации ПВ-сетей

Архитектура МАС для реализации ПВ-сетей представлена на рис. 3. Ее ключевой компонентой является исполняющая система, управляющая поведением агентов в мире агентов (виртуальном рынке).

Знания, на основе которых агенты принимают решения, могут быть отделены от программного кода и могут храниться в онтологии системы, что обеспечивается с помощью специального инструментария поддержки онтологии и сцен [23]. При этом каждая конкретная ситуация, складывающаяся в реальности, описывается и хранится в системе в виде сцены — инстанции семантической сети онтологии, связывающей конкретные экземпляры объектов (название клиента, имя водителя, номер транспортного средства и т. п.).

Взаимодействие с пользователем осуществляется посредством интерфейса пользователя (веб- или десктопного), важным элементом которого является очередь событий, а взаимодействие с существующими системами — через специальные модули интеграции.

Работа системы строится следующим образом. При поступлении в систему нового события, например заказа, создается его агент, который от лица этого заказа вступает во взаимодействие с агентами ресурсов для поиска лучшего своего размещения. Если выбранный лучший для заказа ресурс уже занят, фиксируется конфликт, и делается попытка найти его разрешение. В ходе этого процесса ресурс может начать предлагать размещенным на нем ранее заказам поискать себе новые размещения. Этот процесс, как цепная реакция, может захватывать все новые заказы и ресурсы, формируя расходящуюся и постепенно затухающую волну изменений (как от камня, брошенного в воду).

Аналогично, если по каким-либо причинам выбранный ресурс становится недоступен, то его

агент должен найти все заказы, которые планируется разместить с использованием этого ресурса. Эти заказы активируются и начинают искать себе другие ресурсы.

При этом формирующееся на выходе решение задачи (например, расписание работы ресурсов) рассматривается не как "статическая" структура данных, полученная в результате однократного применения некоторого алгоритма, а как неустойчивое равновесие (или "устойчивое неравновесие"), поддерживаемое путем взаимодействия двух противоположных сущностей "потребностей" и "возможностей", играющих роли взаимосопряженных понятий, подобных "инь" и "янъ".

Результат считается достигнутым и система завершает свою работу в том случае, когда ни у одного агента нет возможностей улучшить свое состояние.

2.4. Метод компенсаций в ПВ-сетях

Для реализации разработанного подхода был предложен ряд методов и средств, использующих различные варианты организаций и работы ПВ-сетей.

В разработанном методе компенсаций [25] перебронирование ресурсов осуществляется лишь только в том случае, если входной заказ оплачивает ранее распределенным заказам ухудшение их положения, что осуществляется "вольной" переговоров, в упрощенном виде показанной на рис. 4—6.

Разработанный подход во многом интегрирует многие современные идеи оптимального планирования, реализуемого в мета-эвристиках, создавая среду конкурирующих и кооперирующихся алгоритмов (агентов). Так, агенты могут запоминать плохие решения и избегать их за счет использования своей памяти, информировать друг друга о промежуточных опциях, при близости опций могут принимать решения случайно, прекращать поиск при наличии ограничений по времени принятия решений и т. д.

Важным преимуществом этой технологии в планировании и оптимизации ресурсов является возможность адаптивного построения и исполнения планов, когда план не строится всякий раз заново при возникновении новых событий, как это делается в классических методах оптимизации, а только корректируется по мере появления событий в реальном времени.

Такая адаптация осуществляется непрерывно путем выявления конфликтов в расписаниях проведения пере-

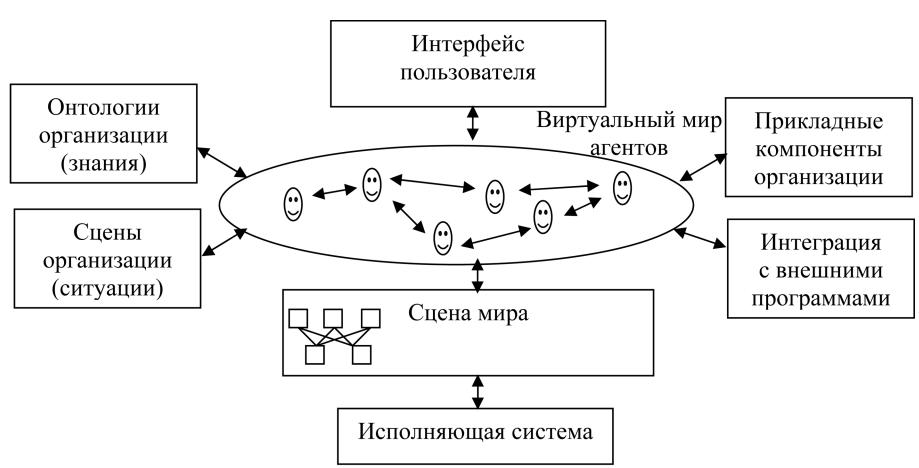


Рис. 3. Архитектура МАС для реализации ПВ-сетей

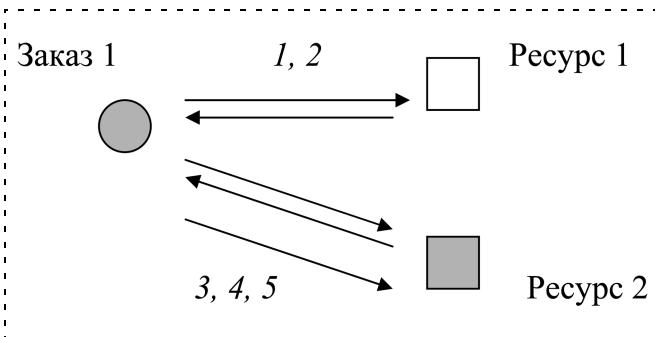


Рис. 4. Обнаружение заказом двух ресурсов и бронирование второго ресурса для реализации заказа:

1 — запрос к первому ресурсу; 2 — ответ и предложение от первого ресурса; 3 — запрос второму ресурсу; 4 — ответ и предложение от второго ресурса; 5 — выбор варианта второго ресурса и его бронирование

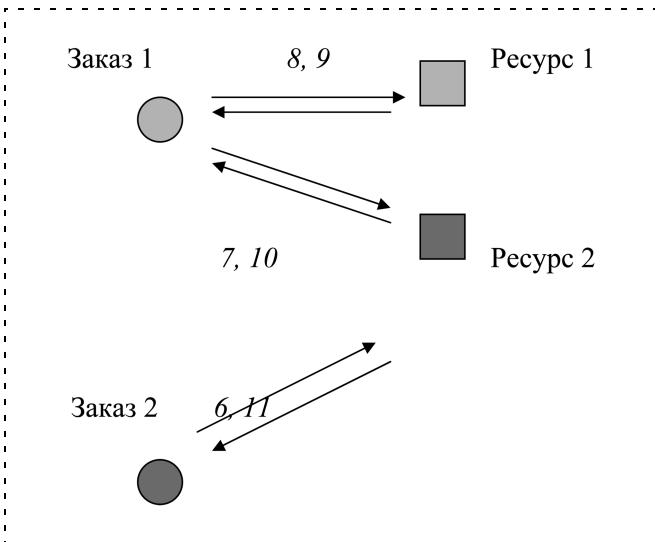


Рис. 5. Приход второго заказа и перебронирование второго ресурса для второго заказа с выплатой компенсации:

6 — запрос ко второму ресурсу; 7 — переадресация предложения первому заказу от второго ресурса; 8 — запрос к первому ресурсу; 9 — положительный ответ и предложение; 10 — разрешение на перебронирование второго ресурса; 11 — согласие и предложение с суммой компенсации первому заказу

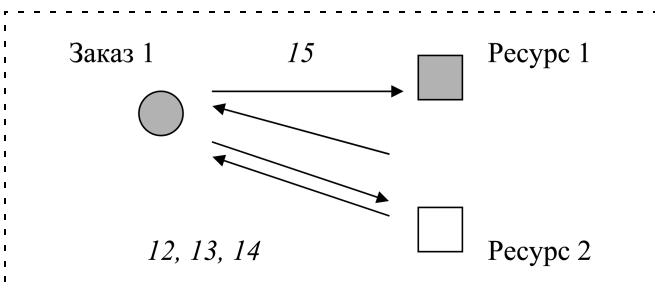


Рис. 6. Освобождение ресурса также вызывает пересмотр ситуации и перепланирование ресурсов даже "на лету", в ходе исполнения заказа:

12 — освободившийся ресурс инициирует выполняющийся заказ; 13 — выясняется, что перегрузка на второй ресурс выгодна для первого заказа; 14 — подтверждение и бронирование второго ресурса; 15 — первый ресурс извещается об изменении маршрута и перегрузке груза на второй ресурс

говоров и достижения компромиссов между агентами заказов и ресурсов, что позволяет системе работать в реальном времени.

Интересно заметить, что данный подход был успешно применен не только для решения задач логистики, но и для понимания текстов, извлечения знаний методом кластеризации и ряда других.

3. Разработка промышленной платформы для МАС и создание первых приложений (1999—2003)

Для развития мультиагентного подхода на базе НПК "Генезис знаний" в Англии в 2000 г. была создана компания Magenta Technology (<http://www.magenta-technology.com>) по разработке мультиагентных технологий для решения сложных задач, соучредителями которой стали два крупных Европейских инвестиционных фонда.

Инициатором создания данной компании с центром разработок в Самаре выступил профессор Г. А. Ржевский, передовое видение и глубокая убежденность которого в принципиальной важности использования фундаментальных принципов самоорганизации и эволюции в разработке программных систем во многом предопределили направления разработок на многие годы вперед.

Важнейшие характерные особенности личности профессора Г. А. Ржевского, такие как широта мышления и острый ум, широкая эрудиция в области современной науки и культуры, научная дерзость, отвергающая любые каноны мышления, и при этом юношеский задор, максимализм и энтузиазм, а также большой опыт разработок, не могли не привлекать и не заражать новыми идеями молодых разработчиков и менеджеров, создавали мощное поле притяжения и инноваций в области разработки мультиагентных технологий.

С этого момента в Самаре началась интенсивная творческая работа по разработке мультиагентных систем, в процессе которой постепенно сформировалась международная команда единомышленников со своей внутренней культурой, работавшая во многом на энтузиазме, вне каких-либо границ рабочего времени, создававшая "коллективный интеллект" компании, постоянно генерировавший новые идеи и предложения, которые немедленно проверялись на деле, уточнялись и развивались, в результате чего создавались программные продукты, не имевшие мировых аналогов.

Очень быстро основой разработок компании Magenta Technology стала мультиагентная платформа [26—27], которая была первоначально разработана в среде Object Pascal для создания моделирующих приложений и одновременно в среде C++ для создания Интернет-приложений.

Разработанная платформа включала в себя следующие компоненты:

- *Run Time Multi-AgentEngine* — диспетчер для управления простыми агентами, фактически представляющий собой операционную систему, в которой осуществлялась передача управления между большим числом агентов (до 100 тыс.) и обеспечивалась высокая скорость передачи сообщений (до 10 000 сообщений в секунду);
- *Ontology & Scene Constructor* — конструктор онтологии, позволяющий создавать онтологии в форме семантических сетей для формализованного описания различных предметных областей, а также сцены, отражающие как ситуацию на входе системы, так и получаемые результаты [28]. Таким образом, в разработанных системах изначально обеспечивалась высокая производительность системы, и при этом мультиагентные технологии с первых шагов комбинировались с технологиями семантического веба.

В этот период был разработан ряд первых прототипов промышленных систем для логистики, включая МАС для решения задач управления танкерами и грузовиками, курьерами, планирования проектов в компании, моделирования расписания поездов, поставки и ремонта стекол для автомобилей; управления цепочками поставок и других [29—36].

Кроме того, на основе той же платформы был создан ряд таких систем для совершенно других областей применения: поддержки Инtranet-системы компании, извлечения знаний из баз данных методом кластеризации, понимания текста, коллективного расчета крыла самолета, поддержки здорового питания, оптимизации размещения баннеров по сайтам [37—48] и т. п.

В дальнейшем разработанные мультиагентные платформы первого поколения были объединены в платформу на языке Java в среде J2EE, ставшей де-факто промышленным стандартом для многих заказчиков.

Рассмотрим наиболее интересные примеры перечисленных выше систем.

3.1. Мультиагентная система кластеризации для извлечения знаний

Многие компании накопили большие базы данных, содержащие данные о заказах клиентов, производстве и продаже изделий, движении товаров на складе, приеме и увольнении сотрудников и т. д. При этом гигабайты хранящихся там данных, как правило, лежат "мертвым грузом", хотя содержат в себе важные скрытые знания о моделях поведения клиентов, типовых характеристиках заказов, закономерностях принятия решений и т. п.

Несмотря на наличие множества пакетов программ, предназначенных для визуализации и анализа такого рода данных, включая системы data mining

(извлечения знаний из данных), задача оперативного анализа этих данных в реальном времени и выявления скрытых закономерностей по-прежнему не решена. Проблема состоит в том, что эти системы, как правило, требуют хотя бы предварительного знания и начальной классификации данных. К примеру, при исследовании возраста покупателей надо заранее решить, что будут исследоваться возрастные группы от 16 до 19 лет, от 20 до 23 лет и т. д. Вместе с тем, сама по себе структура указанных групп представляет собой предмет исследований и не может быть заранее фиксирована. Кроме того, сама структура этих данных может меняться в реальном времени, например, когда все новые пользователи приходят на сайт Интернет-магазина.

В связи с этим нами был разработан мультиагентный подход к кластеризации данных [38], в котором структуры кластеров пересматриваются по ходу появления новых записей, т. е. используется самоорганизация данных, аналогичная разработанной для адаптивного планирования.

При этом каждому кластеру и каждой записи в соответствие ставится свой агент, действующий от лица и по поручению записи или кластера. Новая запись может войти в уже имеющийся кластер, родить новый кластер, объединяясь со своими соседками, или остаться вне кластерной структуры. Записи может быть выгодно, например, войти в большой или самый плотный кластер, поскольку с просмотром этого кластера начинается любой анализ данных менеджерами и выработка предложений, в том числе скидок, его участникам. В некоторых случаях менеджеров могут интересовать самые большие кластеры, а в других — самые быстро растущие или меняющие направление роста с уменьшением на увеличение и т. д.

Решение на таком виртуальном рынке, как и ранее, каждый агент принимает за себя, ориентируясь на заданную менеджером формулу ценности и имеющиеся в распоряжении кластеров и записей виртуальные деньги. Если речь идет о продажах, то, например, входящая запись получает процент от сделки, который она может потратить на то, чтобы состоять в одном или нескольких кластерах. Аналогично, если кластер "впустил" запись (т. е. обоим по их расчетам оказалось выгодным такое решение), то другие записи получают извещение об этом событии и имеют право пересмотреть свое решение и покинуть данный кластер, если ценность для них уменьшилась (например, кластер расширился и его средняя плотность упала).

Возможно, что выход одной записи из кластера тут же может сильно ухудшить ситуацию для всех остальных, и тогда кластер покинут другие записи. В результате произойдет "катастрофа", и этот кластер распадется, но вместо него образуется набор

других кластеров, имеющих, возможно, совершенную другую структуру.

Такой подход к кластеризации был применен для анализа данных магазинов Duty Free для аэропорта Хитроу. В результате работы системы на заданном интервале времени был обнаружен факт (скрытая закономерность), что вечером в пятницу все пассажиры рейсов Лондон—Амстердам покупали преимущественно парфюмерию. Для менеджера магазина этот факт может говорить о том, что в этот момент времени просто больше нечего было покупать (и тогда эта информация малозначима), или о том, что люди нуждаются в такого рода товарах, и соответствующее изменение ассортимента может существенно поднять объем продажи и, в результате, прибыль такого магазина при том же самом объеме арендованных площадей.

Разработанная система применялась для решения и ряда других сложных задач, в частности, для анализа и кластеризации документов страховой компании [42], в ходе чего было за короткий срок обработано более 20 тыс. документов, дав экономию около четырех человеко-лет для компании заказчика.

3.2. Мультиагентная система понимания текста

Одной из самых сложных современных задач, которая пока безуспешно решается методами традиционной компьютерной лингвистики, является создание систем понимания смысла текстов. Области применения такого рода систем в сети Интернет и при обработке документов компаний чрезвычайно обширны: аннотирование и сортировка материалов, интеллектуальный поиск информации (в отличие от поиска на основе ключевых слов), "умные" редакторы текстов, понимающие суть редактируемого текста, автоматический перехват SMS-сообщений террористов и т. п.

Разработанный подход предлагает качественно новое "распределенное" решение указанной задачи, также использующее принципы самоорганизации и эволюции [42]. В этом подходе каждому слову в распознаваемом предложении и каждому смыслу этого слова в толковом словаре в соответствие становится агент, действующий от его имени и по его поручению. Надо заметить, что, например, английскому слову Table в Оксфордском словаре соответствует 18 разных смыслов, соответствующих разным контекстам, например, Table — как стол для размещения предметов, Table — как диаграмма в Excel и т. д. Цель агентов слов и смыслов — правильно установить связи между собой, восстановив контекст в сцене, т. е. построить семантическую сеть понятий и отношений (сцену), соответствующую ситуации, представленной в тексте.

При таком подходе в случае распознавания фразы "чашка упала со стола" слово "стол" обращается

к онтологии и порождает сначала все 18 агентов смыслов, которые начинают конкурировать между собой и устанавливать связи с другими словами в предложении. При этом, например, агент стола как места размещения предметов делает запрос ко всем другим словам предложения, нет ли здесь кого-то, кто может быть связан с предметами, которые могут находиться на столе. Чашка "смотрит" по своему дереву классов и немедленно находит, что именно она и есть такой предмет. Далее начинается выяснение возможных отношений между этими словами, в ходе которого устанавливается, что они связаны, и чашка ранее стояла "на" столе, и теперь чашке еще предстоит выяснить, в каком состоянии она находится сейчас и не разбилась ли она при падении.

Разработанный подход позволил быстро построить ряд промышленных систем для понимания текста.

Одна из первых систем была предназначена для автоматического реферирования абстрактов статей по молекулярной биологии по всемирно известной базе данных Medline, пополняемой на 1 миллион статей по медицине каждый год. В первой версии системы онтология содержала всего 140 понятий и отношений (эксперимент, организм, принадлежит, ген, входит, хромосома и т. д.), но при этом на выборке из 1000 рефератов обеспечивала правильность отбора реферата до 85 %, хотя только 25 % слов в предложениях реферата при этом идентифицировались системой, что свидетельствует как об известной избыточности естественного языка, так и его высокой чувствительности к смыслу фраз. Это подтверждает известный факт, что для понимания текста чужого языка в узкой предметной области, зная онтологию мира предметной области, достаточно понимать лишь малую часть слов словаря.

Другой результативный проект был связан с уже упомянутой выше задачей для страховой компании [42], когда было необходимо обработать большой массив документов с текстами контрактов в области страхования недвижимости, автомашин и др. В сочетании с системой кластеризации, обеспечивающей построение кластеров сцен, полученных в ходе распознавания предложений, за несколько часов работы системы удалось выяснить, какие именно пункты контрактов являются наиболее востребованными, и построить образцы контрактов, наиболее отвечающих изменяющимся пожеланиям клиентов, что в ручном режиме потребовало бы примерно нескольких лет работы группы квалифицированных экспертов компании.

Данный подход применялся также для разработки системы обработки факсов [43], мета-поиска информации в сети Интернет [44], интеллектуальных интернет-порталов и социальных сетей [46—47] и других.

3.3. Мультиагентная система коллективного расчета крыла самолета

В этой задаче у заказчика имелась промышленная система проектирования механических объектов крыла самолета, в которой главную проблему составляла задача проверки совместимости инженерных решений.

Суть проблемы состояла в том, что отдельный инженер может сделать изменения в габаритных размерах или других, например, физико-химических свойствах материалов своего узла, которые могут опасно повлиять на соседние элементы крыла. Для проведения геометрических проверок объектов использовалась специальная система анализа геометрического пересечения объектов (clash analysis), которая выявляла подобные конфликты примерно раз в две недели, что часто оказывается слишком поздно.

Для решения этой задачи был предложен подход, в котором крыло самолета представляется как семантическая сеть его элементов [22]. При этом агент изменившейся части крыла (например, шасси) мог идентифицировать себя с узлом этой семантической сети и сразу выявить, кто является соседями данного узла (элемента), и вместо неэффективной проверки "каждого с каждым", как это ранее делалось у заказчика, проверять только соседние элементы крыла, вновь используя принцип развивающейся волны переговоров.

В результате создания системы было показано, что время на проверку узлов крыла самолета при этом сокращается в десятки раз, что существенно повышает эффективность решения задачи.

3.4. Мультиагентная система поддержки здорового питания

В этом проекте заказчик работал над созданием интернет-портала, предлагающего своим пользователям индивидуальную диету, перестраиваемую в реальном времени. Например, если человек в процессе обеда съел "лишнее" пирожное, то он должен был сообщить об этом системе, после чего система перепланировала меню на ужин или даже на завтрак следующего дня, вводя дополнительные ограничения, или, в дальнейшем, предлагая спортивные упражнения, например, вечернюю прогулку на велосипеде.

В качестве решения задачи предлагалась мультиагентная система [22], в которой все продукты, диеты и пользователи имели своих агентов. При этом агенты еды сами складывались в комбинации исходя из предпочтений пользователя, требований диеты и сочетаемости блюд (например, агент мяса мог пригласить агента красного вина), с учетом на-

циональных, религиозных и других особенностей каждого пользователя.

Агент выбранной диеты, например, с ограничителем в 2000 калорий, проверял построенное в результате самоорганизации блюда меню и, если сумма калорий выходила за пределы 2000, выбирал наиболее калорийное блюдо и обращался к нему с предложением покинуть меню, соответственно за ним "тянулись" приглашенные им блюда. Освободившееся место занимало блюдо меньшей калорийности при условии, что не возникало конфликтов по другим критериям с другими блюдами. Если такие конфликты возникали, то они решались на основе предпочтений пользователя, и тогда из меню пользователя "уходило" либо новое блюдо, либо размещенные ранее другие блюда — как и ранее, в других разработанных нами системах, вызывая цепочку перестановок переменной и заранее непредвиденной длины.

В результате меню на день складывалось как самоорганизующаяся система, легко изменяемая в результате возникающих отклонений от плана.

3.5. Мультиагентная система размещения баннеров по веб-сайтам

В этой задаче требовалось в реальном времени находить наилучшее размещение баннеров продуктов компаний по веб-сайтам, в зависимости от того, как идет рекламная кампания.

Для решения данной задачи была разработана система, которая успешно используется в целом ряде маркетинговых компаний [48].

В этом решении, если рекламная кампания идет успешно, то агенты кампании и сайтов вполне удовлетворены. Если же баннер на каком-либо сайте плохо "кликается" пользователями, то его необходимо перенести на более подходящий сайт, но место там может быть занято, и тогда требуется пересмотреть позиции размещенных там баннеров. Тут вновь возникает волна изменений, которая может давать результат путем самоорганизации через пересмотр решений баннерами и сайтами в ходе их переговоров.

В маркетинговых агентствах в текущее время такую работу выполняют специальные менеджеры, но на практике очень трудно уследить за сотнями и тысячами одновременно идущих кампаний, учесть зависимости между сайтами и кампаниями, следить за всеми изменениями в реальном времени и т. д.

Разработанная система позволяет существенно повысить эффективность рекламных кампаний и снизить трудоемкость и стоимость этого процесса.

4. Промышленные проекты в транспортной логистике (2003—2008)

4.1. Мультиагентная система управления танкерами

Данная система предназначена для управления крупнотоннажными танкерами в международной компании, осуществляющей до 70 % мировой трансконтинентальной перевозки нефти [49]. Ежедневно в эту компанию приходит 10—15 крупных запросов. Диспетчеры и менеджеры компании должны оперативно оценить ситуацию и принять решение по выделению танкера.

При этом диспетчеру и менеджерам надо постоянно держать в голове расположение и графики движения собственных судов, а также позиции конкурентов, учитывать особенности прохождения Суэцкого канала, если необходимо (требуется временная частичная выгрузка нефти), принимать во внимание, какие корабли и в какие порты могут входить, где и когда танкеру лучше заправляться, каковы погодные условия и т. д. Для решения этой задачи была разработана система, позволяющая построить цепочки перераспределения заказов по танкерам, включающие до семи обменов грузами.

Координатор Европейской программы Roadmap Михаил Люк из Southampton University (UK) так объясняет [6] преимущества применения агентов в разработанной системе: "Путем моделирования каждого танкера как отдельного агента достигается возможность видеть варианты и оперативно реагировать на возникающие события в реальном времени".

В настоящее время система используется для моделирования сложных ситуаций, позволяя в этих случаях более эффективно планировать ресурсы. Стоимость одного дня простоя такого танкера составляет более 100 тысяч долларов, что позволяет оценить экономический эффект от внедрения системы.

Для заказчика также оказалось очень важным извлекать и формализовать знания диспетчеров, необходимые для принятия решений, что позволяет уменьшить зависимость бизнеса от человеческого фактора.

4.2. Мультиагентная система управления корпоративными такси

Данная система [50, 51] позволяет компании корпоративного такси эффективно планировать до 13 тысяч заказов в день при наличии 2000 машин, оснащенных GPS-датчиками, из которых 800 находятся постоянно на линии.

Компания работает через call center, в котором звонки принимают 130 операторов. При поступлении нового заказа система должна обеспечить инди-

видуальный подход к каждому клиенту, выделяя клиентам только машины нужного класса или классом выше, с зарекомендовавшим себя шофером, дает по требованию машины для инвалидов, для перевозки детей или животных, с прицепом, для курящих пассажиров и т. п. При этом водители работают в компании как фрилансеры, арендуют машины у компании, и при этом могут выходить на работу в произвольное время. У водителей имеются наладочные компьютеры, которые позволяют водителю появиться на "радаре" системы при выходе на работу в любое время дня и ночи, т. е. для системы заранее не известно ни число заказов, ни число ресурсов.

При появлении нового заказа система автоматически находит наилучшую машину на электронной карте и предварительно бронирует ее под заказ. В среднем на подачу машины уходит 9 минут, при этом система продолжает примерно половину этого времени непрерывно перераспределять заказы с учетом появляющихся новых ресурсов и не принимает окончательного решения до динамически определяемого момента, когда необходимо отправить машину с учетом времени в пути.

Важно отметить, что система, в первую очередь, пытается максимизировать прибыль компании. Однако при этом также учитывается и ряд других критериев, важных для бизнеса. Например, при выборе из двух примерно равных опций, система отдает заказ тому водителю, который давно не получал заказов, что позволяет избегать претензий к диспетчерам, которые ранее могли дать хороший заказ "своему" водителю. Кроме того, когда водитель заканчивает работу, система подбирает ему заказы по дороге домой, что повышает заработок водителей и снижает текучесть кадров.

Уже в первый месяц внедрения число реализованных заказов увеличилось на 7 % при том же парке машин, теперь 97 % всех заказов такси планируются автоматически, без участия диспетчеров; в 3,5 раза (до 2 %) снизилась доля заказов, выполненных не вовремя; на 22,5 % уменьшился холостой пробег такси, каждое такси теперь выполняет по две дополнительные поездки в неделю при тех же затратах времени и горючего, что отразилось в повышении доходности от каждой машины на 5 %; заказ такси происходит на 40 % быстрее; время подготовки новых операторов снизилось в 4 раза; более эффективно заработал веб-сайт, откуда поступает уже 16 % заказов компании.

Данная система получила национальный приз Великобритании за лучшее инновационное решение в бизнесе в 2009 г., а сюжет об этом решении был показан в программе "Время" на Первом канале Российского телевидения.

4.3. Мультиагентная система консолидации грузов

Данная система обеспечивает планирование консолидации грузовых перевозок для сетей супермаркетов. В числе перевозимых товаров — продукты питания и напитки, бытовая электроника, одежда и обувь и т. д.

Объем заказов — примерно 4000 в день, для перевозки используется парк грузовиков в 300 машин различного объема, сеть развозки включает в среднем 600 географических позиций. Сложность задачи, в первую очередь, связана с наличием складов промежуточного хранения, необходимостью разделения больших заказов на несколько поездок и, наоборот, консолидацией малых заказов разного объема, требованиями сочетаемости грузов, ограниченными возможностями приемки машин на разных складах и т. д.

Для решения данной задачи была создана система [52—62], автоматизирующая основные этапы консолидации заказов, включая прием заказов, выбор маршрута, подбор лучшей консолидации, выбор грузовика и решения сопутствующих задач. Эта система оказалась одной из самых сложных, в которой архитектура виртуального рынка включает целый ряд дополнительных классов агентов, действующих одновременно и проактивно, поскольку процесс построения консолидации сочетается с процессом их пересмотра и разрушения.

В частности, в этой системе заказы динамически разбиваются на подзаказы, которые потом консолидируются в группы, а для групп также динамически строятся поездки, которые, в свою очередь, привязываются к грузовикам. Если заказ был разбит неудачно и не удалось запланировать хорошие поездки, проводится переразбиение и планирование начинается заново. Большое число активных агентов требует применения более развитых механизмов диспетчеризации агентов, когда активными становятся только наиболее перспективные агенты, конкурирующие между собой.

В настоящее время система находится на стадии внедрения и ведутся доработка и настройка логики принятия решения по результатам планирования.

Ожидается, что с внедрением системы будет получен не только значительный экономический эффект от более эффективного планирования ресурсов, но и существенно сокращено число операторов.

4.4. Мультиагентная система управления сдачей машин в аренду

Заказчик имеет 100 станций, на каждой размещается в среднем до 150 машин разных классов. Клиенты могут заказывать машину по телефону, непосредственно приходить на станцию или присыпать заказы по сети Интернет.

Для удобства клиентов можно договориться о доставке машины в нужное время к нужному месту. Но тогда требуется послать машину с водителем, который может работать как в определенные дни, так и сверхурочно. Также приходится посыпать водителей, чтобы забрать машины от клиентов, поэтому в ряде случаев приходится в одной машине отправлять несколько водителей, один из них, например, отвезет машину клиенту, а другой по дороге заберет использованную машину и пригонит ее на станцию.

Для решения задачи была разработана система динамического планирования, которая позволяет по событиям разного рода оперативно перепланировать распределение машин и строить расписание водителей, доставляющих или забирающих автомобили. При этом система обращается к электронной карте и показывает водителям рекомендуемые маршруты движения, а также посыпает им в реальном времени инструкции на телефоны.

В настоящее время закончена разработка и проверка работы системы на реальных данных и начато ее развертывание на первых пяти станциях, до конца текущего года ожидается внедрение во всех остальных станциях и доработка по итогам опытной эксплуатации.

Эффект внедрения обусловлен возможностью более эффективно распределять машины по региону в целом, чтобы избежать избытка машин на одних станциях и дефицита на других, а также сокращения числа внутренних поездок и объемов сверхурочных водителей.

Заключение

В данной статье дается обзор научных и прикладных разработок мультиагентных систем, разработанных и созданных в Самарской школе мультиагентных технологий.

Главный результат этих работ состоит в том, что мультиагентные технологии уже сегодня позволяют решать сложные задачи и создавать для управления предприятиями промышленные системы принципиально нового класса, базирующиеся на фундаментальных принципах самоорганизации и эволюции. В результате внедрения обеспечивается повышение качества и эффективности работы предприятий, сокращаются затраты, уменьшается зависимость от человеческого фактора.

Разработанные методы и средства создания мультиагентных систем оказываются применимы для решения широкого круга сложных задач, от кластеризации и понимания текстов — до транспортной логистики, что свидетельствует о высокой действенности развивающегося подхода.

Результаты разработок доказывают важные преимущества подхода и определяют широкие перспективы его применения для решения сложных задач в реальном времени в самых различных сферах.

Список литературы

1. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.
2. Хорошевский В. Ф. Методы и средства проектирования и реализации мультиагентных систем // Матер. семинара "Проблемы искусственного интеллекта". ИПУ РАН, 1999.
3. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 5–63.
4. Wooldridge M. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley and Sons Ltd, February 2002, Chichester, England. 340 p.
5. Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть I. Основы агентного подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 11–21.
6. Agent Technology: Computing as Interaction. A Roadmap for Agent Based Computing. <http://www.agentlink.org/roadmap/index.html>
7. <http://www.lostwax.com>
8. <http://www.whitestein.com/>
9. <http://nutechsolutions.com/index.asp>
10. <http://www.magenta-technology.com>
11. Bonabeau E., Theraulaz G. Swarm Smarts. What computers are learning from them? // Scientific American. 2000. Vol. 282. N 3. P. 54–61.
12. Thompson J. Ant Colony Optimisation // School of Mathematics — Cardiff University, SWORDS, 2004.
13. Koestler A. The Ghost in the Machine. Arkana, 1990.
14. Brussel H. van, Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA — Computers in Industry, 37 (3) (1998). P. 255–274.
15. Marek V. Preface to Proceedings of 5-th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing HoloMAS 2009, Linz, Austria. Springer, 2009. P. V–VII.
16. Leitao P. ADACOR: A Holonic Architecture for Agile and Adaptive Manufacturing Control // Computers in Industry. 2006. 57(2). P. 121–130.
17. Rzevski Q., Skobelev P. Emergent Intelligence in Large Scale Multi-Agent Systems // Education and Information Technologies Journal, Iss. 2. 2007. V. 1.
18. Скобелев П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. 2002. № 6. С. 45–61.
19. Витих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
20. Витих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78–87.
21. Андреев В. А., Витих В. А., Батищев С. В., Скобелев П. О. и др. Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. 2003. № 1. С. 126–137.
22. Rzevski G., Skobelev P., Andreev V. Magenta Toolkit: A Set of Multi-Agent Tools for Developing Adaptive Real-Time Applications // Proceedings of 4-th International Conference on Holonic Approach and Multi Agent Systems (HoloMAS 2007). Germany, June 2007.
23. Абрамов Д. В., Андреев С. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Разработка средств построения и использования он-
- тологий для поддержки принятия решений // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара 27 июня — 1 июля 2005. СНЦ РАН, 2005. С. 435–440.
24. Андреев В., Андреев М., Батищева Т., Олейников А., Скобелев П., Чевелев А. Конструкция агента в системах оперативного планирования и принятия решений // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара 27 июня — 1 июля 2005. СНЦ РАН, 2005. С. 414–420.
25. UK Patent Application No. 101516 — Managing a Virtual Environment-authors: G Rzevski, P Skobelev.
26. Iwkushkin K., Minakov I., Rzevski G. and Skobelev P. Magenta Multi-Agent Engine for Desktop Applications // Proc. of the 3rd Intern. Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT'2001, Ufa, Russia, 21–26 September 2001. Ufa State Aviation Technical University — Institute JurInfoR-MSU. V. 1: Regular Papers, 2001. P. 81–89.
27. Batishchev S., Iwkushkin K., Minakov I., Skobelev P. and Rzevski G. Magenta Multi-Agent Systems: Engines, Ontologies and Applications // Proc. of the 3rd Intern. Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT'2001. Ufa, Russia, 21–26 September 2001. — Ufa State Aviation Technical University — Institute JurInfoR-MSU. V. 1: Regular Papers, 2001. P. 73–80.
28. Andreev V., Iwkushkin K., Minakov I., Rzevski G., Skobelev P. The Constructor of Ontologies for Multi-Agent Systems // In 3rd Intern. Conference "Complex Systems: Control and Modelling Problems", Samara, Russia, September 4–9, 2001. P. 480–488.
29. Иващенко А. В., Ивкушкин К. В., Никифоров В. А., Скобелев П. О. Мультиагентная система поддержки управления распределением ресурсов в проектах предприятий // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара, Самарский научный центр РАН, 27 июня — 1 июля 2005. С. 428–434.
30. Rzevski G., Skobelev P., Batishchev S., Orlov A. A Framework for Multi-Agent Modelling of Virtual Organisations // In Camarinha-Matos L. M. and Afsarmanesh H. (eds), Processes and foundations for Virtual Organisations, Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 253–260.
31. Rzevski G., Skobelev P., Korablin M. Multi-Agent Models of Networked Organisations // Proc. of Intern. Workshop "New Models of Business: Managerial Aspects and Enabling Technology", School of Management of Saint Petersburg State University, Russia, June 28–29. 2001. P. 46–49.
32. Батищев С. В., Орлов А. Ю., Скобелев П. О. Метод push-pull взаимодействия при составлении и адаптации краткосрочного плана производства в условиях высокой динамики спроса // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара: СНЦ РАН, 27 июня — 1 июля, 2005. С. 397–402.
33. Andreev M., Rzevski G., Ivashchenko A., Skobelev P., Shveikin P., Tsarev A. Adaptive Planning for Supply Chain Networks // Proc. of 4-th Conf. on Holonic Approach and Multi Agent Systems (HoloMAS 2007). Germany, June 2007.
34. Basra R., Lü K., Rzevski G., Skobelev P. Resolving Scheduling Issues of the London Underground Using a Multi-Agent System. Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science) 3593, 188–196. 2005.
35. Basra Rajveer, Lü Kevin, Rzevski George, Skobelev Petr. Resolving Scheduling Issues of the London Underground Using a Multi-Agent System // Journal of Engineering School. London, 2003.
36. Rzevski G., Himoff J., Skobelev P. Magenta Technology: A Family of Multi-Agent Intelligent Schedulers // Proc. of Workshop on Software Agents in Information Systems and Industrial Applications (SAISIA). Fraunhofer IITB, Germany, February, 2006.
37. Андреев В. В., Абрамов Д. В., Калягин Д. В., Минаков И. А., Скобелев П. О. Разработка семантического Интранет компании на основе конструктора онтологии // Тр. VII Междунар. конф. по проблемам управления и моделирования сложных систем, Самара. Июнь 2005. Самара, СНЦ РАН, 2005. С. 421–427.
38. UK Patent Application No. 304995 — Data Mining. Authors G. Rzevski, I. Minakov, P. Skobelev.
39. Вольман С. И., Калягин Д. В., Минаков И. А., Скобелев П. О. Разработка системы нахождения бизнес-правил с использованием кластеризации на примере данных логистических компа-

- ний // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара, Самарский научный центр РАН, 22 июня — 28 июня 2005, С. 409—413.
40. Rzevski G., Skobelev P., Minakov I., Volman S. Dynamic Pattern Recognition Using Multi-Agent Technology // Proc. of World Science and Engineering Academy and Society Conference (WSEAS 2007). Dallas, Texas, USA, March 2007.
41. Minakov I., Rzevski G., Skobelev P., Volman S. Creating Template Contract Documents Using Multi-Agent Text Understanding and Clustering in Car Insurance Domain. HoloMAS 2007. P. 361—370.
42. UK Patent Application No. 305634 — Automated Text Analysis. Authors: G. Rzevski, I. Minakov, P. Skobelev.
43. Минаков И. А., Скобелев П. О., Томин М. С. Мультиагентная система интеллектуальной обработки факсов, используемых для обмена бизнес-данными // Тр. VIII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", Самара, Самарский научный центр РАН, 24 июня — 28 июня 2006. С. 510—515.
44. Kanteev M., Minakov I., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Meta-Search Engine Based on Domain Ontology // International Workshop "Autonomous Intelligent Systems: Agent and Data Mining" (AIS-ADM 2007). St. Petersburg, Russia, June 3—5, 2007.
45. Скобелев П. О. MyAgent framework: мультиагентный подход к разработке социальных сетей с эмерджентным интеллектом // Тр. IX Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, Самарский научный центр РАН, 22—28 июня 2007. С 511—527.
46. Минаков И. А., Скобелев П. О. Набор инструментальных средств для интеллектуализации Интернет-порталов и социальных сетей // Тр. IX Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, Самарский научный центр РАН, 22—28 июня 2007. С. 528—534.
47. Вольман С. И., Кантеев М. К., Минаков И. А., Скобелев П. О. Разработка системы проактивных предложений релевантного клиента в режиме реального времени на основе анализа действий пользователя Интернет-порталов // Тр. IX Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, Самарский научный центр РАН, 22—28 июня 2007. С. 543—548.
48. Вольман С. И., Минаков И. А., Скобелев П. О., Якушин А. В. Разработка мультиагентной системы поддержки принятия решений для оптимизации хода рекламных кампаний в сети Интернет // Тр. IV Междунар. конф. "Проблемы управления" (МКПУ-IV) (Январь 26—30, 2009). ИПУ РАН, 2009. С. 1628—1638.
49. Himoff J., Skobelev P., Wooldridge M. Magenta Technology: Multi-Agent Systems for Ocean Logistics // Proc. of 4-th Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multi Agent Systems (AAMAS 2005). Holland, July 2005.
50. Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies // Proc. of AAMAS 2009 8th Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems 10—15 May, 2009, Budapest, Hungary. P. 29—36.
51. Зоткин А. Г., Кривопустов К. В., Тихонов М. Д., Скобелев П. О., Верник М. В., Абрамов Д. В., Корнев А. П., Глащенко А. В., Городнов Н. Н., Аглединов В. В., Иващенко А. В., Волков Д. И., Олейников А. В., Хальзов А. В. Автоматизированная система диспетчеризации, динамического планирования и мониторинга исполнения заказов мобильными ресурсами. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2009612433. 15 мая 2009 г.
52. Андреев В. В., Глащенко А. В., Иващенко А. В., Иноземцев С. В., Скобелев П. О., Швейкин П. К. Мультиагентные системы адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Сб. трудов 4-й Междунар. конф. по проблемам управления МКПУ-IV (26—30 января 2009 года). М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2009. С. 1534—1542.
53. Andreev V., Glashchenko A., Ivashchenko A., Inozemtsev S., Rzevski G., Skobelev P., Shveykin P. Magenta Multi-agent Systems for Dynamic Scheduling // Proc. of the First International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART 2009 (Porto, Portugal 19—21 January, 2009). P. 489—496.
54. Андреев В. В., Батищев С. В., Батищева Т. В., Глащенко А. В., Скобелев П. О. Метод динамического баланса интересов при планировании расписаний в задаче транспортной логистики // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, СНЦ РАН, 27 июня — 1 июля 2005. С. 388—396.
55. Батищев С. В., Батищева Т. В., Иноземцев С. В., Ивкушин К. В., Скобелев П. О. Опыт применения мультиагентной системы планирования расписаний в задаче транспортной логистики // Тр. VII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, СНЦ РАН, 27 июня — 1 июля 2005. С. 388—396.
56. Himoff J., Rzevski G., Skobelev P. Magenta Technology: Multi-Agent Logistics i-Scheduler for Road Transportation // Proc. of 5-th Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2006). Japan, May 2006.
57. Глащенко А. В., Иноземцев С. В., Киселев П. О., Скобелев П. О., Чевелев А. С. Развитие архитектуры мультиагентных систем для планирования расписаний в транспортной логистике // Тр. VIII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, СНЦ РАН, 24 июня — 28 июня 2006. С. 530—540.
58. Андреев М. В., Глащенко А. В., Иноземцев С. В., Киселев И. П., Сафонов А. В., Скобелев П. О. Логика динамической балансировки трейд-оффов агентов в задачах построения связанных расписаний в транспортной логистике реального времени // Тр. VIII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, СНЦ РАН, 24 июня — 28 июня 2006. С. 541—546.
59. Абрамов Д. В., Кантеев М. К., Сафонов А. В., Скобелев П. О. Разработка средств учета индивидуальных предпочтений в логистических системах поддержки принятия решений // Тр. VIII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, СНЦ РАН, 24 июня — 28 июня 2006. С. 504—509.
60. Глащенко А. В., Скобелев П. О., Ржевский Г. А., Чевелев А. С., Иноземцев С. В., Киселев И. П. Мультиагентный планировщик для решения задач транспортной логистики // Тр. VIII Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, СНЦ РАН, 24 июня — 28 июня 2006. С. 522—529.
61. Skobelev P., Glashenko A., Grachev J., Inozemtsev S. MAGENTA Technology Case Studies of Magenta i-Scheduler for Road Transportation // Proc. of 7-th Intern. Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems AAMAS 2007 — US, Hawai, May 2007.
62. Скобелев П. О., Глащенко А. В., Гречев И. А. Опыт использования мультиагентного планировщика в транспортной логистике // Тр. IX Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Самара, Самарский научный центр РАН, 22 июня — 28 июня 2007. С. 556—566.
63. Yankov I. A., Skobelev P. O., Shibanov S. V., Shashkov B. D. Multi-Agent approach for planning and resource allocation in dynamic heterogeneous networks // Dynamics of heterogeneous systems: conference proceedings / Penza, State University, 2009. Is. 1. P. 22—37.
64. Andreev S., Rzevski G. A., Shveikin P., Skobelev P. O., Yankov L. A. A Multi-Agent Scheduler for Rent-a-Car Companies Applications // Proc. of Intern. Conf. of HoloMAS 2009. Lins. Austria, September 2009. P. 305—314.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.5.01

И. А. Каляев, чл.-корр. РАН, директор,
А. Р. Гайдук, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
С. Г. Капустян, д-р техн. наук, нач. отдела,
Научно-исследовательский институт
многопроцессорных вычислительных систем
имени академика А. В. Каляева
Южного федерального университета, г. Таганрог
kap@mvs.sfedu.ru

Самоорганизующиеся системы группового управления интеллектуальными роботами¹

Рассматриваются самоорганизующиеся системы группового управления действиями интеллектуальных роботов для достижения ими поставленной цели. Алгоритм функционирования системы группового управления формируется на основе экспертного подхода и соответствующих законов природы. Предлагаемый подход демонстрируется на примере перемещения по поверхности некоторого тела группы интеллектуальных транспортных роботов с радиальным вектором тяги. Приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: интеллектуальный подвижный робот, группа, групповое управление, самоорганизация, кластер

Введение. Необходимость применения групп роботов для решения ряда практических задач обусловлена ограниченными возможностями отдельных роботов, если даже они являются интеллектуальными. Поэтому одним из требований, предъявляемым к роботам нового поколения, является возможность функционирования в составе групп. В общем случае группа роботов может включать транспортные роботы, связные роботы, роботы для ведения разведки, изучения химической, радиационной или электромагнитной обстановки и т. д. В связи с этим возникают задачи автономной оценки роботами, функционирующими в составе групп, поставленных целей, условий их достижения, анализа ситуации в целом и планирования действий отдельных роботов на уровне группы или ее кластера. Если решение этих задач осуществляется самими роботами группы в автономном режиме, т. е. без участия оператора, то группа называется *самоорганизующейся*. Интеллектуальные роботы имеют цифровые системы управления, поэтому выполнение указанных функций группового управления возлагается на вычислительный комплекс системы управления группой, который может быть централизованным или распределенным [1].

¹ Исследования поддержаны грантом РФФИ № 10-07-00235-а.

В последнее время чаще всего рассматриваются цифровые распределенные системы группового управления роботами (СГУР), реализующие децентрализованное управление. Преимущества таких СГУР достаточно аргументированно обоснованы в [1–3].

Отметим, что если перед группой роботов ставится несколько целей, то задача группового управления роботами включает и задачу распределения этих целей между роботами группы. Некоторые подходы к решению этой весьма сложной задачи методами решения классической задачи о назначениях с применением методов оптимизации рассмотрены в [4]. Применение принципов самоорганизации к решению такой задачи представляется довольно трудоемким. Поэтому в данной статье ставится задача разработки условий осуществления процесса самоорганизации централизованной системы управления действиями интеллектуальных роботов группы, перед которой поставлена задача достижения одной цели.

Постановка задачи. Предположим, группа (рис. 1) включает интеллектуальные роботы R_1, \dots, R_N . В вычислительном комплексе одного из роботов (лидера группы [1]) протекает некоторый процесс самоорганизации СГУР, в результате чего формируется, а затем и реализуется алгоритм управления действиями роботов всей группы по достижению поставленной перед группой цели.

Функционирование группы роботов, согласно рис. 1, протекает следующим образом. Все роботы группы R_1, \dots, R_N собирают информацию об окружающей их среде в виде векторов e_i и вместе с информацией о своем состоянии (вектором s_i) пере-

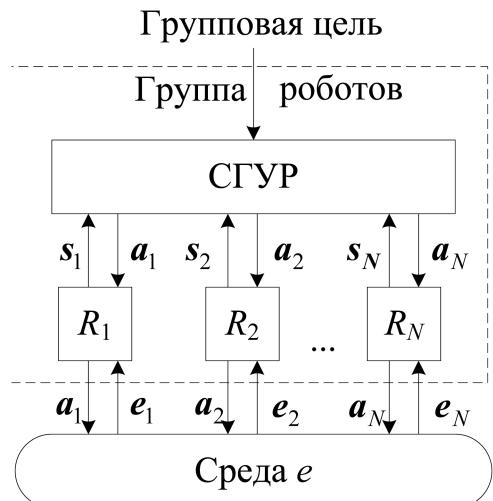


Рис. 1. Группа интеллектуальных роботов

дают лидеру группы. В вычислительном комплексе лидера на основе информации о групповой цели, о состоянии роботов, среды и информации о возможностях роботов группы сначала формируется структура СГУР, а затем и задаются управления роботами группы. При этом роботы взаимодействуют друг с другом, обмениваясь информацией об изменениях окружающей среды, о предпринимаемых ими и планируемых действиях, о собственном состоянии и т. д.

Процесс самоорганизации системы группового управления интеллектуальными роботами значительно осложнен тем, что заранее не известны ни конкретная цель, которая будет поставлена перед группой, ни условия, в которых она должна быть достигнута. Поэтому заранее нельзя указать конкретный алгоритм формирования управлений. Он должен формироваться самой группой или ее лидером в зависимости от складывающейся ситуации.

Вместе с тем, группа роботов (даже интеллектуальных и большой численности) не может обеспечить достижение всевозможных целей. Очевидно, что каждая группа роботов ориентируется на достижение определенного круга целей при достаточно ограниченных условиях. Следовательно, круг алгоритмов формирования управлений, вообще говоря, ограничен, и это дает основание полагать, что рассматриваемая задача синтеза самоорганизующейся СГУР имеет решение.

Самоорганизация возникает тогда, когда при исходной структуре системы не достигается или достигается не эффективно поставленная перед системой цель. В общем случае самоорганизация — это завершающий этап **эволюции структуры системы**, обусловленной необходимостью достижения системой некоторой цели. Другими словами, в самоорганизующейся системе протекает следующая цепочка событий. В исходной системе (с устойчивым положением равновесия или устойчивым движением) под влиянием внешних условий и поставленной цели происходит эволюция структуры системы. В результате этого первичного перехода — эволюции — возникает неустойчивая структура. Именно в ней и начинается процесс самоорганизации, который завершается образованием новой структуры системы с устойчивым положением равновесия или устойчивым движением, но с большими отклонениями от равновесного состояния или равновесного движения [5].

Ряд вопросов процессов самоорганизации рассматривается в коллективной монографии [6]. В частности, вводятся понятия "естественной" и "искусственной" самоорганизации и подчеркивается, что ход естественной самоорганизации, которая протекает в "естественных системах", определяется соответствующими законами природы. Искусственная самоорганизация протекает в искусственных, технических системах в соответствии с **локальными правилами самоорганизации**, которые "задает разработчик системы", руководствуясь моделью управля-

мого процесса, полученной из тех же естественных законов природы. При этом авторы особо подчеркивают, что процесс искусственной самоорганизации может протекать в искусственной системе, если она помимо функциональной части будет содержать структурную часть, которая "генерирует функциональную часть" [6, с. 309] или некоторые "специфические структуры" [6, с. 303].

Применительно к группам роботов такими "специфическими структурами" можно считать кластеры, т. е. некоторые совокупности роботов, выделенные в данной группе для достижения той или иной конкретной цели [1, 2]. Под структурной частью самоорганизующейся группы роботов, очевидно, следует понимать СГУР (рис. 1). Общих локальных правил самоорганизации, по которым структурная часть "генерирует функциональную часть", авторы этой работы не указывают. Это вполне естественно, так как эти правила, как отмечалось выше, зависят от поставленной цели, условий ее достижения и возможностей роботов группы.

Таким образом, для построения самоорганизующейся системы, прежде всего, необходимо найти **локальные правила самоорганизации**. Эти правила должны приводить к конкретной структуре и конкретному алгоритму функционирования СГУР. Другими словами, результатами процесса самоорганизации в группе роботов, перед которой поставлена конкретная цель, должны быть: новая структура группы, состав кластера, структура и алгоритм функционирования СГУР кластера, ориентированного на достижение этой цели.

Решение задачи. Необходимость формирования кластера в группе роботов обусловлено тем, что для достижения некоторой цели, как правило, требуются не все роботы группы. Конечно, при небольшой численности группы или при малых габаритных размерах роботов кластер может включать и все роботы группы. Ряд алгоритмов формирования кластеров в группе роботов, в общем случае, предложен в работе [1].

Понятно, что состав, численность, техническое и программное обеспечение роботов, включаемых в кластер, определяются как теми действиями, которые необходимо выполнить для достижения поставленной цели, так и возможностями роботов группы. Математически процесс автономного формирования кластера в группе роботов можно описать следующим образом [4].

Каждый робот R_i , $i = \overline{1, N}$, группы может выполнить некоторую совокупность действий $\mathbf{a}_i = \{a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}\}$. Для достижения некоторой цели T_μ в условиях $f_\mu^\circ = \{f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots\}$ необходимо выполнить определенную совокупность действий $\mathbf{a}_\mu = \{a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, a_{p_{\mu}\mu}\}$, причем каждое из них характеризуется, по крайней мере, двумя признаками: типом и интенсивностью.

Кроме того, на процесс достижения цели T_μ обычно накладывается множество других требований $\mathbf{q}_\mu = \{J(\mu), t_{\text{дост}}(\mu), n(\mu), \dots\}$, связанных с процессом достижения цели. Здесь $J(\mu)$ — критерий эффективности, $t_{\text{дост}}(\mu)$ — время достижения цели, $n(\mu)$ — число роботов кластера, ориентированного на достижение данной цели T_μ и т. п.

Если все элементы $a_{v\mu}, v = \overline{1, p_\mu}$, по типу и по интенсивности имеются среди элементов a_{ji} робота R_i данной группы, т. е. $a_{v\mu} \in \mathbf{a}_i, v = \overline{1, p_\mu}$, то достижение цели T_μ в "проектных" условиях \mathbf{f}_μ° , очевидно, может обеспечить один этот робот.

Однако обычно возможностей одного робота недостаточно, и достижение цели T_μ могут обеспечить лишь несколько роботов R_i , которые удовлетворяют следующему условию:

$$a_{v\mu} \in \{\mathbf{a}_{i_1(\mu)}, \mathbf{a}_{i_2(\mu)}, \dots, \mathbf{a}_{i_{n(\mu)}(\mu)}\}, v = \overline{1, p_\mu}, \quad (1)$$

где $n(\mu)$ — число роботов группы, среди множества действий которых имеются все действия $\mathbf{a}_\mu = \{a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, a_{p_\mu\mu}\}$, выполнение которых в условиях \mathbf{f}_μ° обеспечивает достижение этой цели.

Если каждое действие $a_{v\mu}$ выполняется одним роботом R_i , то численность кластера K_μ , ориентированного на достижение цели T_μ , будет равна числу действий $a_{v\mu}$, т. е. $n(\mu) = p_\mu$. В противном случае $n(\mu) < p_\mu$.

Как правило, одно и то же действие $a_{v\mu}$ выполняется различными роботами R_i с различной эффективностью [1, 2, 4]. Пусть $q_{iv}(\mu)$ — это оценка эффективности выполнения роботом R_i действия $a_{v\mu}$. Очевидно в кластер K_μ , ориентированный на достижение цели T_μ , целесообразно включать те роботы группы R_1, \dots, R_N , которые обеспечивают достижение цели с наибольшей эффективностью, т. е. те роботы, при которых выполняется условие

$$J = \sum_{v=1}^{p_\mu} q_{iv}(\mu) \rightarrow \max_{i \in \overline{1, N}}. \quad (2)$$

При этом число роботов кластера, ориентированного на достижение цели T_μ в проектных условиях \mathbf{f}_μ° , должно быть минимальным, т. е.

$$n(\mu) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Условия (1)–(3), фактически, являются локальными правилами самоорганизации кластера K_μ , ориентированного на достижение цели T_μ . Вместе с тем, реализация условий (1)–(3) является алгоритмом формирования этого кластера. Создание алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных роботов для выполнения этого алгоритма самими роботами, очевидно, не представляет каких-либо проблем [1].

Подчеркнем, что если для некоторой группы условие (1) не может быть выполнено, то данная группа, очевидно, не способна обеспечить достижение цели T_μ в условиях \mathbf{f}_μ° .

Конечно, для реализации алгоритма, соответствующего условиям (1)–(3), должны быть сформированы множества $\mathbf{a}_i = \{a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{m_i i}\}$, а также

$$\mathbf{a}_\mu = \{a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, a_{p_\mu\mu}\}, \mathbf{f}_\mu^\circ = \{f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots\} \text{ и } \mathbf{q}_\mu = \{J(\mu), t_{\text{дост}}(\mu), n(\mu), \dots\}.$$

Формирование множеств \mathbf{a}_i , очевидно, не представляет больших сложностей. Поскольку здесь рассматриваются искусственные интеллектуальные роботы, то множество \mathbf{a}_i определяется назначением и конструкцией робота R_i , а компоненты a_{ji} этого множества представлены в техническом паспорте. Поэтому основные сложности создания самоорганизующейся СГУР связаны с формированием целевых множеств $a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots$ и $q_\mu = \{J(\mu), t_{\text{дост}}(\mu), n(\mu), \dots\}$, содержание которых определяется заранее неизвестной целью.

Эту проблему можно преодолеть на основе онтологического подхода, т. е. подхода, основанного на знаниях [7]. Как отмечалось выше, та или иная группа роботов всегда формируется для достижения лишь определенного круга целей $T_\mu \in \Xi$, где Ξ — множество целей, на достижение которых ориентирована данная группа роботов. Необходимые для достижения каждой конкретной цели T_μ действия $a_{v\mu}, v = \overline{1, p_\mu}$, и порядок их выполнения в определенных условиях \mathbf{f}_μ° , q_μ определяются известными законами природы.

Сформировать множества $\mathbf{a}_\mu = \{a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, a_{p_\mu\mu}\}$ и \mathbf{f}_μ° могут методами теории интеллектуальных систем сами роботы в реальном времени [2, 4] ("ИИ-подход") на основе соответствующих законов природы. В настоящее время более реалистичным представляется "экспертный подход", который состоит в априорной формулировке этих множеств экспертами в виде онтологических моделей и запоминании их в базах знаний роботов группы [1, 4, 7]. В дальнейшем имеется в виду "экспертный подход".

Совокупность действий $a_{v\mu}, v = \overline{1, p_\mu}$, и последовательность их выполнения в некоторых "проектных" условиях \mathbf{f}_μ° , разработанные экспертами, фактически являются алгоритмом достижения поставленной цели $L_\mu(\mathbf{a}_\mu, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{q}_\mu) = \{a_{v_1(\mu)}, a_{v_2(\mu)}, \dots, a_{p_\mu(\mu)}, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{q}_\mu\}$. Этот алгоритм включает p_μ действий $a_{v\mu}$. Однако действительные условия \mathbf{f}_μ , при которых роботы кластера будут действовать, скорее всего, будут от-

личаться от проектных, т. е. $\mathbf{f}_\mu \neq \mathbf{f}_\mu^\circ$. Поэтому алгоритм $L_\mu(\mathbf{a}_\mu, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{q}_\mu)$ должен быть робастным или адаптивным, т. е. способным обеспечить выполнение необходимых действий в изменившихся условиях.

Таким образом, если алгоритмы L_μ достижения всех целей $T_\mu \in \Xi$ сформированы и находятся в базе знаний всех роботов группы R_1, \dots, R_N , то самоорганизующийся алгоритм группового управления при одной цели T_μ , поставленной перед группой, заключается в следующем:

- получив цель в виде множества $\mathbf{a}_\mu = \{a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, a_{p_\mu\mu}\}$ и условия $\mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{q}_\mu$, роботы R_1, \dots, R_N на основе соотношений (1)–(3) формируют кластер $K_\mu = \{R_{i_1(\mu)}, R_{i_2(\mu)}, \dots, R_{i_n(\mu)}\}$ мощностью $n(\mu)$.
- При формировании кластера могут использоваться алгоритмы коллективного взаимодействия, предложенные в работе [1];
- из своих баз знаний роботы $R_i \in K_\mu$ извлекают алгоритм $L_\mu(\mathbf{a}_\mu, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{q}_\mu)$ и адаптируют его к текущим условиям \mathbf{f}_μ ;
- роботы $R_i \in K_\mu$ выполняют действия $a_{i_1(\mu)} = a_{v_1(\mu)}, a_{i_2(\mu)} = a_{v_2(\mu)}, \dots, a_{i_n(\mu)} = a_{p_\mu(\mu)}$ в соответствии с алгоритмом $L_\mu(\mathbf{a}_\mu, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{q}_\mu)$.

Покажем эффективность предлагаемого подхода к построению самоорганизующейся СГУР на примере достижения конкретной цели.

Пример. Рассмотрим задачу перемещения цилиндрического тела по горизонтальной поверхности группой N одинаковых транспортных интеллектуальных роботов R_i с радиальной тягой P_i . Роботы располагаются на боковой поверхности тела случайным образом так, что направления векторов тяги всех роботов проходят через центр тяжести тела, т.е. они не могут повернуть тело вокруг вертикальной оси (рис. 2). Сила тяги P_i каждого робота R_i может принимать значения либо $P_i = P_0 \neq 0$, либо

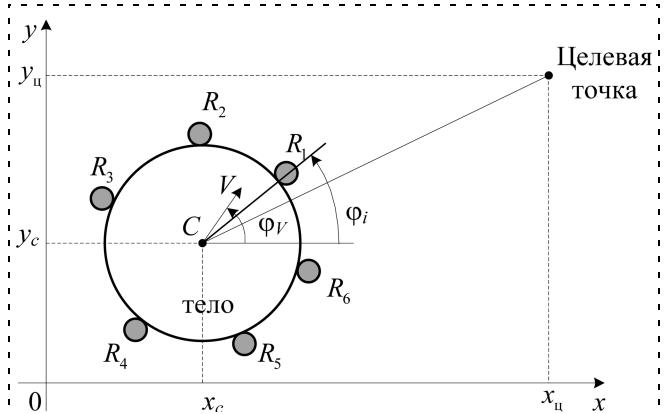


Рис. 2. Тело и роботы

$P_i = 0$, $i \in [1, N]$. Если некоторая сила $P_{i^*} \neq 0$ и начальная скорость тела V_{t0} равна нулю, то тело перемещается по прямолинейной траектории в направлении действия этой силы, при этом сила трения всегда направлена по касательной к траектории движения. Если начальная скорость тела V_{t0} не равна нулю, то движение тела происходит по некоторой кривой.

В том случае, когда заданная траектория перемещения тела является криволинейной, направление касательной к ней все время меняется, поэтому перемещение тела может осуществляться только в некоторой окрестности заданной траектории. В частности, это может быть реализовано поочередным действием роботов соответствующего кластера, имеющих различное направление тяги. В связи с этим возникает задача организации самой группой роботов, во-первых, кластера, способного осуществить перемещение тела в окрестности некоторого участка заданной траектории, а во-вторых, алгоритма периодической смены одного активного робота этого кластера другим по мере изменения направления касательной к заданной траектории. Кроме того, роботы кластера должны остановить тело так, чтобы оно достигло заданного конечного положения с некоторой точностью. Таким образом, группа роботов может успешно решить задачу перемещения тела из исходного положения в конечное вдоль заданной траектории, если ее СГУР будет самоорганизующейся.

Для формулировки локальных правил самоорганизации приведем математическую формулировку рассматриваемой задачи. Пусть точка C — это центр тяжести тела с учетом влияния роботов, а x_c и y_c — его координаты в неподвижной системе координат $x0y$; φ_i — угол между осью x и направлением силы тяги P_i . Соответствующую систему нелинейных дифференциальных уравнений перемещения тела можно записать [1] следующим образом:

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_c &= \sum_{i=i^*}^{i^*+1} P_i \cos \varphi_i - \varphi_x(\dot{x}_c) = f_1^\circ; \\ m\ddot{y}_c &= \sum_{i=i^*}^{i^*+1} P_i \sin \varphi_i - \varphi_y(\dot{y}_c) = f_2^\circ, \end{aligned} \quad (4)$$

где m — масса тела с учетом масс присоединившихся роботов; $\varphi_x(\dot{x}_c), \varphi_y(\dot{y}_c)$ — нелинейные функции — проекции на оси координат силы сопротивления перемещению тела.

Будем предполагать, что задана функция $y = f(x)$, описывающая требуемую траекторию перемещения тела, а также координаты начального $x_c = x_0, y_c = y_0$ и конечного $x_c = x_u, y_c = y_u$ положений тела. Предположим также, что $P_0 > \sqrt{\varphi_x^2(0) + \varphi_y^2(0)}$.

Тогда для перемещения тела в окрестности некоторого участка траектории роботы R_{i^*} и R_{i^*+1} кластера должны удовлетворять следующему условию:

$$\operatorname{tg} \varphi_{i^*} \leq \frac{df(x)}{dx} = f'(x) \leq \operatorname{tg} \varphi_{i^*+1}. \quad (5)$$

Если заданная траектория является достаточно криволинейной и целевая точка находится достаточно далеко, то при движении тела левое или правое неравенства в (5) будет нарушено. В этот момент СГУР заменяет работавший кластер на другой, при котором снова будет выполняться условие (5). Этот процесс продолжается, пока тело не приблизится к целевой точке на расстояние торможения, т. е. пока выполняется условие

$$\sqrt{(x_{\text{ц}} - x_c)^2 + (y_{\text{ц}} - y_c)^2} > l_{\text{торм}}, \quad (6)$$

где $l_{\text{торм}}$ — расстояние, которое необходимо для остановки тела роботами кластера. Если же условие (6) нарушается, то СГУР переходит к реализации режима торможения.

Смена активного робота ($P_i \leq 0$) в кластере происходит при удалении центра тяжести тела от заданной траектории на некоторое, заранее назначенное расстояние $d_{\text{доп}}$. Удаление d_c тела от траектории определяется либо по формуле

$$d_c = \frac{|[x_c - f^{-1}(y_c)][x_c - f^{-1}(y_c)]|}{\sqrt{[x_c - f^{-1}(y_c)]^2 + [y_c - f(x_c)]^2}}, \quad (7)$$

если

$$|x_c - f^{-1}(y_c)| \leq l_m \text{ и } |y_c - f(x_c)| \leq l_m, \quad (8)$$

где $f^{-1}(y)$ — функция обратная функции $f(x)$, l_m — заданная величина,

либо по формулам

$$d_c = x_c - f^{-1}(y_c), \text{ если } |x_c - f^{-1}(y_c)| > l_m,$$

или

$$d_c = y_c - f(x_c), \text{ если } |y_c - f(x_c)| > l_m.$$

В данном случае $\mu = 1$, и указанные выше множества и критерий имеют следующий вид:

$$T_\mu = \{P_{i^*}, P_{i^*+1} \mid \operatorname{tg} \varphi_{i^*} \leq f'(x) \leq \operatorname{tg} \varphi_{i^*+1}\};$$

$$a_i = \{P_i; \varphi_{pi}\},$$

$$\text{здесь } P_i = \begin{cases} P_0, & \varphi_{pi} = \begin{cases} \varphi_i \\ \varphi_i + \pi \end{cases}; \\ 0, & \end{cases}$$

$$f_\mu^\circ = \{f_1; f_2\};$$

$$q_\mu = \{y = f(x); J_\mu; x_0; x_{\text{ц}}; y_0; y_{\text{ц}}; d_{\text{доп}}; V_{\text{т.доп}}\};$$

$$J_\mu = \{d_c \leq d_{\text{доп}}\},$$

где $\{f_1; f_2\}$ — функции из уравнений (4); $d_{\text{доп}}$ — допустимая погрешность отклонения тела от заданной траектории; $V_{\text{т.доп}}$ — скорость тела, при кото-

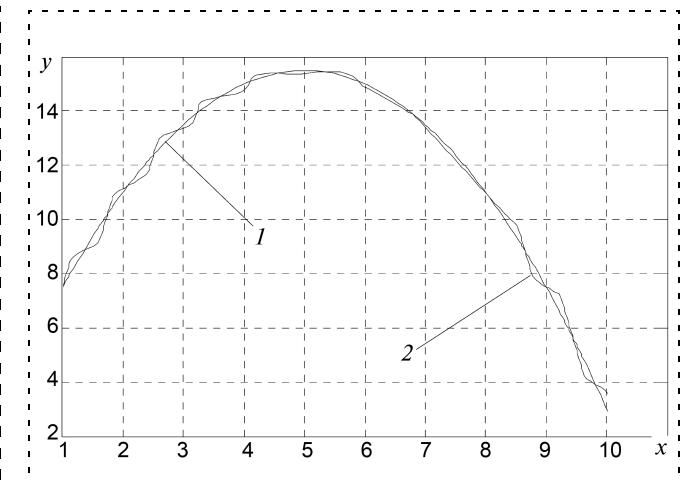


Рис. 3. Траектория перемещения тела

рой тело фиксируется тормозными устройствами роботов.

Изложенное позволяет сформулировать локальные правила самоорганизации (ЛПС) для решения данной задачи.

ЛПС 1. Первый активный кластер образуется из роботов R_{i^*} и R_{i^*+1} , где i^* таково, что значение $f'(0)$ удовлетворяет условию (5).

ЛПС 2. Новый кластер формируется при нарушении одного из неравенств в условии (5).

ЛПС 3. Действием робота R_{i^*} или R_{i^*+1} тело перемещается, пока выполняется условие $|d_c| \leq d_{\text{доп}}$. При нарушении этого неравенства активным становится робот R_{i^*+1} или R_{i^*} .

ЛПС 4. В процессе перемещения тела непрерывно контролируется условие (3). При его нарушении роботы переходят к торможению тела, пока не выполнится условие

$$\sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2} \leq V_{\text{т.доп}}.$$

В результате реализации системой управления правил **ЛПС 1**, ..., **ЛПС 4** протекает процесс самоорганизации в группе роботов R_1, \dots, R_N , что обеспечивает автономное формирование алгоритма действий роботов группы по перемещению тела вдоль траектории, заданной функцией $y = f(x)$.

Проверка эффективности процесса самоорганизации и алгоритма формирования действий роботов группы проводилась путем моделирования в системе MATLAB. Группа состояла из 23 роботов. Координаты начальной точки $x_0 = 1, y_0 = 7,5$, а конечной — $x_{\text{ц}} = 10, y_{\text{ц}} = 3$. Заданная траектория описывается функцией $y = f(x) = 3 + 5x - 0,5x^2$. Результат моделирования при $d_{\text{зад}} = 0,1$ показан на рис. 3, где цифрами обозначены: 1 — заданная, 2 — полученная траектории перемещения тела.

Заключение. В статье предложен общий подход к построению самоорганизующихся систем группового управления интеллектуальными роботами. Данный подход предполагает формирование экс-

пертами и запоминание в памяти интеллектуальных роботов: множества возможных действий $a_i = \{a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}\}$ каждого робота R_i группы, множества действий $a_\mu = \{a_{1\mu}, a_{2\mu}, \dots, a_{p_{\mu\mu}}\}$, необходимых для достижения каждой из целей, поставленных перед группой; множества проектных условий $f_\mu^\circ = \{f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots\}$, в которых должна быть достигнута каждая цель; множества дополнительных условий и ограничений $q_\mu = \{J_\mu, t_{\text{дост.}\mu}, n(\mu), \dots\}$, а также множества локальных правил самоорганизации. Такой подход предполагает достаточно высокий уровень интеллекта у роботов. Результаты моделирования в различных условиях свидетельствуют, что предложенный алгоритм работы самоорганизующейся СГУР обеспечивает успешное перемещение тела вдоль заданной траектории на горизонтальной плоскости.

Список литературы

1. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группе роботов. М.: Физматлит, 2009.
2. Каляев И. А., Лохин В. М., Макаров И. М. и др. Интеллектуальные роботы: учеб. пособ. для вузов / Под общей ред. Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007.
3. Goldberg D., Cicirello V., Dias M. B., Simmons R., Smith S., Stentz A. Market-Based Multi-Robot Planning in a Distributed Layered Architecture. Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata // Proc. from the 2003 International Workshop on Multi-Robot Systems, Kluwer Academic Publishers. 2003. V. 2. P. 27–38.
4. Ивченко В. Д., Корнеев А. А. Анализ методов распределения заданий в задаче управления коллективом роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 7. С. 36–42.
5. Пригожин И., Конденди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002.
6. От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В. Г. Редько. М.: Ком Книга, 2006.
7. Колчин А. Ф., Елисеева Н. В. Представление модели знаний специалиста-проектировщика на основе онтологического подхода // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2006. № 3. С. 66–69.

Поздравляем Юбиляра!



Научному советнику лаборатории Института проблем управления сложными системами РАН, эксперту аппарата Правительства Самарской области, заведующему кафедрой "Инженерия знаний" Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, члену редколлегии журнала "Мехатроника, автоматизация, управление", доктору технических наук, профессору

Владимиру Андреевичу Виттиху

исполнилось 70 лет

В. А. Виттих — известный ученый, крупный специалист в области информатики и процессов управления, создатель и руководитель одной из ведущих отечественных научных школ по интеллектуализации управления и обработки информации в сложных системах.

Свою научную деятельность Владимир Андреевич начал сразу после окончания вуза и прошел путь от инженера в Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Академии наук СССР (г. Новосибирск) до основателя (с 1987 г.) и директора (по 2009 г.) Института проблем управления сложными системами (с 1987 по 1997 гг. Самарский филиал Института машиноведения РАН).

Являясь автором более 260 научных работ (включая четыре монографии), В. А. Виттих внес огромный вклад в развитие таких направлений современной науки об управлении, как теория принятия решений и теория систем управления на основе компьютерной обработки знаний. Им обоснована ключевая роль учета неопределенности проблемных ситуаций и предложен онтологический подход при принятии решений применительно к процессам управления сложными слабоформализуемыми техническими и социотехническими системами. Его научные результаты являются фундаментом для повышения эффективности систем управления различного назначения (для энергетических установок, промышленных предприятий, территориальных комплексов и др.).

Свою высокоэффективную научную деятельность В. А. Виттих успешно сочетает с работой по подготовке высококвалифицированных инженерных и научных кадров. Им подготовлено 3 доктора и 20 кандидатов наук.

Он является бессменным председателем Оргкомитета Международных конференций "Проблемы управления и моделирования в сложных системах", ежегодно проводимых в Самаре с 1999 г. на базе ИПУСС РАН.

В. А. Виттих награжден орденами "Знак Почета", "Дружбы" и нагрудным знаком "За заслуги перед Самарской областью".

Высокий профессионализм, широкая эрудиция, большая трудоспособность, чуткость и отзывчивость снискали ему большое уважение учеников и коллег.

*Редакционный совет, редакционная коллегия и коллектив редакции журнала
сердечно поздравляют Владимира Андреевича Виттиха с юбилеем
и желают ему здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов
на благо российской науки и техники.*



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ

Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 12 (117)
ДЕКАБРЬ
2010

Главный редактор:
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Часть II	54
Матвеев В. В., Распопов В. Я., Лихошерст В. В. Система ориентации беспилотного летательного аппарата с каналом видеонаблюдения.	66
Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание параметров движения летательных аппаратов по критерию максимального правдоподобия	70

В. Ю. Рутковский, д-р техн. наук, зав. лаб.,
В. М. Суханов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
В. М. Глумов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН, Москва
rutkov@ipu.ru
suhv@ipu.ru
vglum@ipu.ru

Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами¹. Часть II

Приведен краткий анализ ряда работ зарубежных авторов в области управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами (КМР) и определено место в этой области знаний, занимаемое авторами данной работы.

Рассмотрены некоторые задачи обеспечения в том или ином смысле оптимального функционирования КМР. В частности, исследованы вопросы достижимости оптимального захвата груза с последующим манипуляционным приведением связи КМР — груз к конфигурации с минимальным моментом инерции системы. Рассмотрены некоторые вопросы управления траекторным движением КМР и сформулированы условия, обеспечивающие безопасность маневрирования КМР вблизи поверхности обслуживаемого объекта. Предложена система комбинированного энергосберегающего управления КМР, основанная на изменении момента количества движения звеньев манипулятора для управления угловым положением корпуса КМР. Рассмотрена группа задач, связанных с исследованием влияния неизвестности транспортируемого груза на динамику системы ориентации КМР.

Ключевые слова: космический манипуляционный робот, оптимизация, траектории перелета, безопасность функционирования, упругость конструкции, оценивание и идентификация, управление ориентацией, адаптивные алгоритмы

Введение

Данная работа, являющаяся второй частью обзорной статьи [1], посвящена краткому изложению некоторых основных результатов в области управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами (КМР), ранее полученных авторами как в составе международных коллективов (в работе над Проектами INTAS, 1994—1999 гг.), так и в коллективах отечественных ученых (в работе над Проектами РФФИ, 2000—2010 гг.).

В работе [2] была установлена степень структурного сходства между кинематическими и динамическими уравнениями КМР и аналогичными уравнениями для наземного (с неподвижным основанием) манипулятора, на основании чего сделано предположение о возможности использования (с извест-

ными ограничениями) для управления свободно дрейфующими КМР известных алгоритмов управления наземными манипуляторами. Несмотря на такое заключение, проблема управления КМР, функционирующего во внешнем (инерциальном) пространстве, в целом остается далеко не решенной. Причиной этого является динамическая связь между космическим манипулятором и несущим его корпусом КМР, порождающая необходимость расширения вектора измерения состояния КМР для разрешения проблемы преодоления динамических сингулярностей [2]. К этому можно добавить множественность режимов функционирования КМР, каждый из которых требует индивидуального подхода к решению задачи управления КМР в том или ином режиме. Были предложены различные методы управления такими системами [3]. Полученные подходы к управлению КМР могут быть разделены на три группы. К первой группе можно отнести системы, в которых реактивные двигатели, управляющие поступательным и угловым движениями корпуса КМР, дополнительно используются для компенсации влияния динамики манипулятора на движения корпуса. В этом случае, если возмущения от манипулятора не превышают управляющие воздействия реактивных двигателей, могут использоваться алгоритмы управления наземными манипуляторами [4]. Ко второй группе относятся системы, в которых для компенсации возмущений углового положения корпуса КМР со стороны манипулятора используются реактивные машины системы управления ориентацией корпуса [5]. При этом считается допустимым не компенсировать возмущения координат поступательного движения ΔX_0 , ΔY_0 (см. [1]). Управление системами этой группы несколько более сложно, чем в первом случае, хотя использование метода, названного виртуальным манипулятором (VM-метод), может упростить задачу [6]. К третьей группе систем управления КМР относятся свободнодрейфующие КМР, позволяющие минимизировать энергозатраты на управление, поскольку двигатели системы управления движением несущего тела (корпуса КМР) отключены. Эти системы позволяют корпусу КМР свободно перемещаться в ответ на движения манипулятора. При этом из множества возможных траекторий перемещения манипулятора в заданную точку выбирается такая траектория, реализация которой сопровождается ответным разворотом корпуса в требуемое конечное положение [2]. Такой способ управления возможен только в случае отсутствия внешних сил и моментов, действующих на систему, а полный импульс ее движения незначителен.

В указанных выше работах затронуты проблемы управления КМР только в одном, хотя и основном, режиме функционирования — манипуляционном оперировании в инерциальном пространстве, точнее, в задаче перемещения исполнительного кон-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00064).

цевого органа манипулятора (схваты) в заданную точку пространства.

Во второй (данной) части нашей работы рассматриваются некоторые задачи обеспечения в том или ином смысле оптимального функционирования КМР. В частности, исследованы вопросы достижимости оптимального захвата груза с последующим манипуляционным приведением связки КМР—Груз к конфигурации с минимальным моментом инерции системы, обеспечивающим снижение энергозатрат на управление ориентацией.

Рассмотрены некоторые вопросы управления траекторным движением КМР в режиме транспортировки груза. Сформулированы условия, обеспечивающие безопасность маневрирования КМР вблизи поверхности обслуживаемой им орбитальной станции (ОС). Предложена система комбинированного энергосберегающего управления КМР, основанная на изменении момента количества движения звеньев манипулятора для управления угловым положением корпуса КМР.

Решена группа задач, связанных с исследованием влияния нежесткости транспортируемого груза на динамику системы ориентации КМР. В частности, приведена модально-физическая форма (МФМ) уравнений углового движения КМР с учетом упругости груза, являющаяся удобной математической моделью при исследовании динамики и при синтезе алгоритмов управления объектов с нежесткой конструкцией. На основе применения расширенного дискретного фильтра Калмана решена задача совместного оценивания параметров модели КМР с упругим грузом и модально-физических (МФ) координат (упругой и жесткой компонент движения) механических систем такого типа. Рассмотрены три подхода к синтезу алгоритмов адаптации, которые могут применяться для автоматической коррекции базовых законов управления ориентацией КМР при транспортировке длинномерных нежестких грузов.

Об оптимизации конфигурации КМР с захваченным грузом

Как было указано в [1], КМР является много режимным устройством, предназначенным для выполнения различных штатных и нештатных работ в открытом космосе. Общим моментом в этом многообразии задач, решаемых с помощью КМР, является наличие двух обязательных фаз его функционирования: перемещение из одной точки пространства в другую как транспортного средства, переносящего тот или иной полезный груз, и порожний полет. Естественно, что обе эти фазы отличаются друг от друга не только масс-инерционными характеристиками и конфигурацией КМР, но и некоторыми особенностями динамики системы. Эти особенности, в частности, при захвате груза манипулятором, возникают из-за смещения центра масс КМР относительно точки приложения векторов

сил маршевых двигателей, что вызывает появление возмущающих моментов, парирование которых двигателями системы ориентации приводит к увеличению энергозатрат на управление. Неминимальность момента инерции произвольным образом загруженного КМР также является причиной повышенного потребления энергии на управление.

Для снижения непроизводительных затрат энергии на управление КМР в фазе транспортировки груза в [7] предложено уже на стадии проектирования выбирать оптимальные значения структурных параметров КМР, которые далее за счет соответствующей перестройки конфигурации манипулятора позволят обеспечить минимальный (или почти минимальный) момент инерции КМР и одновременно снизить отклонение центра масс инерции КМР от точки приложения управляющих траекторным движением сил F_x и F_y .

Для решения этой задачи в [7] рассмотрен ряд сопутствующих вопросов, к которым относятся выявление границ соответствия характеристик транспортируемого груза возможностям КМР как транспортного средства, определение условий достижимости оптимальной конфигурации КМР как в загруженном состоянии, так и в фазе порожнего рейса, определение способов и типов захвата груза, обеспечивающих физическую реализуемость оптимальной конфигурации КМР, и ряд других задач.

Прежде всего, была определена идеализированная модель манипулятора в виде системы шарнирно связанных между собой жестких звеньев длиной r_1 (плечо) и r_2 (локоть). Длина кистевого звена при решении данной задачи считается пренебрежимо малой.

Поскольку КМР предназначен для транспортировки грузов, различающихся как по габаритным размерам, так и по массам, то была введена обобщенная модель груза, имеющая удлиненную ось и априорно заданные основные инерционные характеристики. Модель принята в виде невесомого стержня длиной l с концевыми массами $m_3 = I_\Gamma/lr_{c3}$ и $m_4 = m_\Gamma - m_3$, где I_Γ , m_Γ — момент инерции и масса груза, r_{c3} — расстояние от левой концевой точки груза до его центра масс.

Схема плоской модели КМР с грузом, системы координат (СК) и обобщенные координаты представлены на рис. 1, на котором обозначены: o — центр приложения управляющих сил F_x и F_y , совпадающий с началом связанной системы координат $oxyz$; c — центр масс КМР с грузом; x_M , y_M — координаты корневой точки манипулятора o_M в связанной СК; α_i , $i = 1, 2, 3$, — общепринятые координаты манипулятора; Y_0 , X_0 , ϑ — координаты, определяющие положение корпуса КМР в инерциальной СК.

Условия статической балансировки (точки o и c совпадают) системы КМР—Груз (КМР-Г) с учетом принятого предложения о направлении сил F_x и F_y

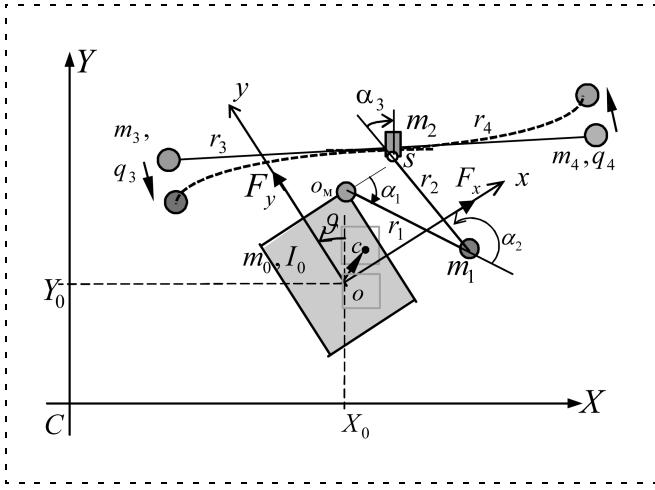


Рис. 1. Схема плоской модели КМР

вдоль соответствующих осей связанный СК $oxyz$, принимают вид

$$\sum_{i=0}^4 m_i x_i = 0, \quad \sum_{i=0}^4 m_i y_i = 0, \quad (1)$$

где x_i, y_i — координаты точек m_i в связанный системе координат.

Поскольку переносимые грузы могут значительно отличаться друг от друга, понятны сложности реализации точного выполнения условий (1). Как следствие, возникает задача минимизации остаточной несбалансированности рассматриваемой системы.

В задаче синтеза оптимальной конфигурации КМР в незагруженном состоянии необходимо определить лишь углы α_1 и α_2 (см. рис. 1), так как координата α_3 в уравнениях кинематики в этом случае не используется.

В [7] показано, что в незагруженном состоянии оптимальная структура КМР по критерию минимума собственного момента инерции одновременно удовлетворяет условиям статической балансировки. При этом оптимальные значения углов α_2 и α_1 выражаются формулами

$$\alpha_2^* = \arccos \frac{r_2'^2 + r_1^2 - r_m^2}{2r_1 r_2'},$$

$$\alpha_1^* = \arccos \frac{1}{r_m^2} (-x_m r_1' \pm y_m \sqrt{r_m^2 - r_1'^2}), \quad (2)$$

где обозначено $r_1' = r_1 + r_2' \cos \alpha_2^*$, $r_2' = \frac{m_2}{m_1 + m_2} r_2$,

$$r_m^2 = \sqrt{y_m^2 + x_m^2}.$$

Кроме того, показано [7], что если выполняются условия

$$\begin{aligned} r_2' + r_1 - r_m &> 0, \quad r_2' + r_m - r_1 > 0, \\ r_m + r_1 - r_2' &> 0, \end{aligned} \quad (3)$$

то оптимальная конфигурация является достижимой.

Условия достижимости оптимальной конфигурации КМР с грузом получены сначала для случая управляемого захвата груза (т. е. захвата в любой, наперед заданной точке продольной оси груза). При этом предполагалось, что ранее найденные значения (2) углов α_1^* и α_2^* сохраняются неизменными, а варьируются угол α_1 и длина r_3 — расстояние от левого конца груза до точки s его захвата роботом ($r_4 = l - r_3$) (рис. 1). В результате получены оптимальные значения угла α_3 :

$$\begin{aligned} \alpha_{31}^* &= \frac{\pi}{2} \text{ и } \alpha_{32}^* = -\frac{\pi}{2}, \quad r_{31}^* = l' - \frac{m_1}{m_1 + m_2} r_2, \\ r_{32}^* &= l' + \frac{m_1}{m_1 + m_2} r_2, \quad l' = \frac{m_4}{m_3 + m_4} l, \end{aligned} \quad (4)$$

откуда следует, что на продольной оси груза имеются две точки (r_{31}^* и r_{32}^*), манипуляционный захват груза в которых позволяет реализовать оптимальную конфигурацию КМР-Г.

Используя (3) и (4), условия соответствия груза возможностям буксировщика можно определить следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} \frac{m_4}{m_3 + m_4} l &> \frac{m_1}{m_1 + m_2} r_2 \text{ (для } \alpha_{31}^*), \\ r_{32}^* &= l' + \frac{m_1}{m_1 + m_2} r_2 < l, \\ \frac{m_3}{m_3 + m_4} l &> \frac{m_1}{m_1 + m_2} r_2 \text{ (для } \alpha_{32}^*). \end{aligned}$$

В [7] получены также условия оптимальной конфигурации для следующих случаев:

1) для неуправляемого захвата известного груза, когда захват не может быть осуществлен в любой точке;

2) для ограниченно управляемого захвата груза, при котором предполагается, что установленная на КМР система визуального наблюдения способна отличить левую часть груза от правой и обеспечить захват груза в ограниченной области, примыкающей к одной или другой его концевой части;

3) рассмотрен также частный случай оптимальной конфигурации для пространственной структуры загруженного робота.

Условия безопасного управления траекторным движением КМР вблизи поверхности орбитальной станции

Управление траекторным движением свободно-летающего КМР вблизи обслуживаемой поверхности орбитальной станции (ОС) имеет ряд особенностей по сравнению с известными задачами сближения и стыковки двух космических аппаратов. К таким особенностям относятся:

- обеспечение безопасности маневрирования КМР в непосредственной близости к поверхности ОС;
- использование новых способов причаливания и стыковки КМР с ОС (например, с помощью манипулятора);
- использование квазискользящих режимов для организации монотонных участков движения при переходе от предыдущего режима функционирования к последующему;
- использование режимов "зависания" в рабочей зоне для беспосадочного выполнения некоторых операций обслуживания и наблюдения.

Несколько подробнее рассмотрим приведенные в [8] некоторые вопросы реализации безопасного маневрирования КМР, в рамках которой целесообразно предусмотреть:

1) формирование безопасных коридорных отрезков траекторий перемещения КМР вблизи поверхности ОС;

2) обеспечение условий безопасности при потере управления ориентацией;

3) зависание (в виде экономичного предельного цикла) на завершающем отрезке траектории перед посадкой или на стыках коридоров;

4) мягкую стыковку с поверхностью ОС из состояния зависания за счет использования управляемой подвижности манипулятора [9].

Указанные фазы маневрирования КМР при его причаливании (траектория 2, начальная точка A_2) или перелете со стартовой площадки A_1 к некоторой точке F на поверхности ОС (траектория 1), а также фаза зависания перед посадкой (траектория 3) изображены на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Здесь обозначено: $\rho = X_0$ — дальность;

$V_r (|V_r| = \sqrt{\dot{X}_0^2 + \dot{Y}_0^2})$ — относительная скорость;

$V_\rho (\equiv \dot{X}_0) = \dot{\rho}$ — скорость сближения; $V_{cr} (\equiv \dot{Y}_0)$ — боковая скорость. При этом $\omega_{g-1} = \rho^{-2} [\bar{V}_r \times \bar{\rho}]$ определяет угловую скорость линии визирования.

Траектория безопасного перелета КМР из начальной точки A_1 , находящейся на поверхности ОС (или вне ее — A_2) в некоторую конечную точку B той же поверхности может быть построена в виде последовательности прямолинейных отрезков (номинальных траекторий), совпадающих с осями координат диаграмм направленности, формируемых с помощью размещенных на поверхности ОС из-

лучателей системы управления траекторией КМР. Несущая частота (или иной признак) каждого излучателя должна быть отлична от других с тем, чтобы система радионаведения КМР могла распознавать момент вхождения КМР в зону действия очередного коридора, формируемого системой приведения ОС.

Безопасность перемещения КМР определяется отсутствием пересечений поверхностей коридоров безопасного движения КМР с поверхностью ОС.

При входе КМР в зону действия радиотехнической (или другой, например, оптической, лазерной и т. п.) системы поиска и взаимозахвата, принадлежащей очередному отрезку движения, происходит взаимный радиозахват, после чего ось ox КМР ориентируется по линии визирования, сформированной радиомаяком ОС, размещенным в конечной (или промежуточной) точке перелета. После этого двигатели (F_x) системы управления сближением разгоняют КМР до минимально необходимой скорости $V_{\rho i}$, определяемой условиями выполняемой задачи и ограничением по расстоянию импульсу торможения на интервале пересечения i -го и $(i+1)$ -го коридоров. После разгона двигатель отключается, и оставшийся отрезок пути по i -му коридору КМР движется по инерции до момента вхождения в $(i+1)$ -й коридор. В этот момент к КМР вдоль оси ox прикладывается тормозной импульс, который на интервале пересечения коридоров должен погасить $V_{\rho i}$ практически до нуля. Следующим за этим состоянием КМР является фаза зависания, в которой решается либо задача переориентации КМР в направлении следующего $(i+1)$ -го отрезка линии визирования, либо задача стыковки с ОС. Изменение направления траектории КМР на пересечениях коридоров движения осуществляется либо переопределением каналов управления продольным ($\rho, \dot{\rho}$) и поперечным (ω_{g-1}) движениями, либо (после завершения процесса торможения) путем предварительного разворота продольной оси КМР до совмещения с направлением линии визирования очередного, $(i+1)$ -го, коридора движения.

В качестве примера рассмотрим условие обеспечения безопасности функционирования КМР в случае отказа системы управления ориентацией при транспортировке груза [10].

В общем случае при потере управления ориентацией ($M_9 = 0$) возникает вращение КМР из-за нескомпенсированного возмущения со стороны системы управления траекторным движением робота.

Под *безопасностью функционирования* КМР при перемещениях вблизи ОС условимся понимать обеспечение условий отсутствия несанкционированных контактов внешних точек конфигурации КМР (с учетом транспортируемого груза) с поверхностью ОС при разворотах (опрокидывании) робота, вызванных потерей управления его ориентацией.

Введем понятие "оболочки" КМР-Г, которую определим в связанной СК oxu как некоторую вы-

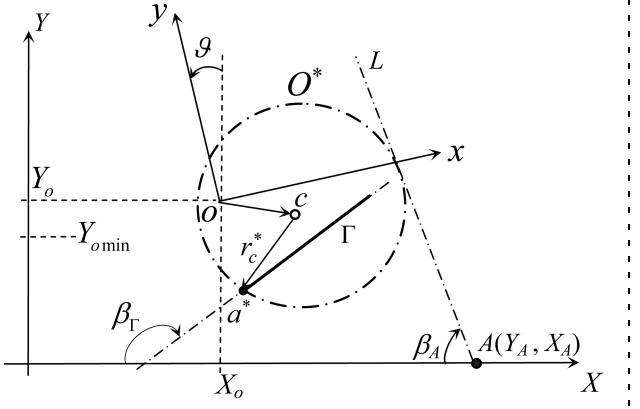


Рис. 3. Геометрия конечной фазы сближения КМР-Г с рабочей зоной сборки

пуклую поверхность вращения с началом в центре масс $c(x_c, y_c)$, проходящую через принадлежащую конфигурации КМР-Г максимально удаленную от его центра масс с точку a . Далее для определенности будем предполагать, что этой точкой является концевая точка $a(x_a, y_a)$ переносимого манипулятором длинномерного груза (рис. 3).

Для фиксированной плоской конфигурации $q_*^a = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_3^*, \bar{\alpha}_4)$ "оболочкой" КМР-Г является окружность O^* с центром, совмещенным с центром масс КМР-Г c , и проходящая через точку $a(x_a, y_a)$. Уравнение этой окружности в связанной с роботом СК oyx имеет вид

$$(x - x_c^*)^2 + (y - y_c^*)^2 = r_c^{*2}; \\ r_c^* = |\rho_{ca}^*| = \sqrt{(x_a^* - x_c^*)^2 + (y_a^* - y_c^*)^2}, \quad (5)$$

где для фиксированной конфигурации КМР-Г, определенной постоянным вектором q_*^a , коэффициенты со звездочкой являются постоянными. В общем случае (при подвижном манипуляторе) эти коэффициенты, зависящие от обобщенных координат q^a , являются переменными. В инерциальной СК CYX уравнение "оболочки" (5) принимает вид

$$[(X - X_o)\cos\vartheta + (Y - Y_o)\sin\vartheta - x_c^*]^2 + \\ + [(Y - Y_o)\cos\vartheta - (X - X_o)\sin\vartheta - y_c^*]^2 = r_c^{*2}. \quad (6)$$

Как было указано выше, при потере управления ориентацией КМР-Г возникает неконтролируемое вращение робота с грузом относительно центра масс c . В этом случае условие безопасности функционирования КМР-Г вблизи поверхности ОС геометрически можно определить как отсутствие точек пересечения или касания оболочки O^* , заданной в виде (6), с поверхностью ОС (в рассматриваемом случае — с плоскостью $Y = 0$). Из геометрии, представленной рис. 3, видно, что такого пересечения

не будет, если выполняется условие $Y_c - r_c^* > 0$, которое с учетом (6) приводится к виду

$$Y_o \geq Y_{o\min} = r_c^* - (x_c^*\sin\vartheta + y_c^*\cos\vartheta). \quad (7)$$

Таким образом, удержание установленной в (7) "высоты" $Y_{o\min}$ перемещения КМР-Г над поверхностью ОС обеспечивает безопасный (в принятом выше смысле) перелет космического робота к цели. Динамика КМР-Г в этом режиме, включая процессы "зависания" в рабочей области, переход системы в режим начальной ориентации оси груза на целевую точку A , достаточно подробно рассмотрена в работах [8–10].

Комбинированное управление ориентацией КМР

Управление траекториями перемещениями КМР в коридорах безопасности требует поддержания требуемой ориентации осей КМР относительно ОС. Рассмотрим возможность экономии расходуемого запаса топлива при управлении угловыми движениями КМР на его перемещениях вблизи поверхности ОС. Идея повышения экономичности управления ориентацией КМР заключается в том, чтобы на участках перемещения КМР требуемая угловая стабилизация осей корпуса осуществлялась бы (по мере возможности) за счет реализации обмена движениями между корпусом КМР и звеньями манипулятора путем приложения управляемых моментов со стороны приводов манипулятора [11].

Газореактивное управление ориентацией КМР с частичным использованием подвижности звеньев манипулятора назовем комбинированным в смысле применения двух типов исполнительных органов (реактивных сопел и моментных приводов манипулятора) для решения единой задачи управления ориентацией КМР на пассивных ($F_x = 0$, $F_y = 0$) участках траекторного перемещения модуля. Как известно [12], такой способ управления позволяет строить оптимальные по расходу топлива системы ориентации.

При формировании алгоритма комбинированного управления необходимо учитывать следующие особенности:

1) области возможного изменения угловых координат и скоростей звеньев манипулятора ограничены ($|\dot{\alpha}_i(t)| \leq \dot{\alpha}_{i\max}$, $|\ddot{\alpha}_i(t)| \leq \ddot{\alpha}_{i\max}$);

2) отклонение координат звеньев манипулятора от оптимального положения [7] приводит к смещению центра масс КМР относительно центра приложения сил и, следовательно, выступает в качестве параметрического возмущения в системе ориентации;

3) реактивные исполнительные органы — релейные, моменты приводов манипулятора по крайней мере ограничены;

4) базовые алгоритмы управления ориентацией КМР $u_{9,9} = f_9(\vartheta, \dot{\vartheta}, t)$ и конфигурацией манипулятора $u_{\alpha,\alpha} = f_\alpha(\alpha, t)$ считаются известными [11].

При синтезе алгоритма комбинированного управления $u_{9,\alpha} = f_{9,\alpha}(\vartheta, \dot{\vartheta}, \alpha, t)$ используется линеаризованная модель КМР (2), на входы которой вместо базовых управлений $M_9(u_{9,9})$ и $M_\alpha(u_{\alpha,\alpha})$ подается векторное воздействие вида $(M_d^9, 0, 0, M_{9,\alpha 1}, \dots, M_{9,\alpha r})^T$.

Возмущение M_d^9 считается заданным (обычно $M_d^9 = \text{const}$). Управляющие воздействия $M_{9,\alpha i}$ в простейшем случае могут быть сформированы в виде линейных функций от угловых координат и скоростей КМР, которые считаются измеряемыми. При этом $M_{9,\alpha i} = k_i^0 (k_i^1 \dot{\vartheta} + \vartheta)$, и задача синтеза сводится к выполнению условий устойчивости и желаемой динамики упрощенной системы дифференциальных уравнений КМР [1]. Окончательная коррекция алгоритмов с учетом нелинейности модели и типичных нелинейностей системы управления

осуществляется методами математического моделирования.

Система комбинированного управления ориентацией КМР используется на каждом из линейных участков (коридоров) траекторных перемещений КМР после завершения начальных маневров переориентации и разгона до $V_{\rho i}$ и работает следующим образом. Ненулевые начальные условия ϑ_0 , $\dot{\vartheta}_0$ и вынужденные движения, порождаемые слабыми возмущающими воздействиями, гасятся в соответствии с принятыми алгоритмами стабилизации углового положения КМР с помощью моментов $M_{\alpha,i}(u_{9,\alpha})$, прикладываемых к корпусу КМР со стороны приводов манипулятора, вызывающими соответствующие изменения координат α_i . При превышении ограничения $|\alpha_i(t)| \leq \alpha_{i\max}$ включается режим "разгрузки" манипулятора, в котором управлением $M_\alpha(u_{\alpha,\alpha})$ звенья манипулятора возвращаются в исходное состояние $\alpha = \alpha^*$ с одновременным удержанием требуемого углового положения корпуса КМР с помощью управляющего момента $M_9(u_{9,9})$, создаваемого реактивными исполнительными органами системы ориентации КМР. Далее следует возврат к манипуляционному управлению $M_9(u_{9,\alpha})$ и т. д.

Работоспособность алгоритмов комбинированного управления ориентацией КМР для случая нелинейной модели (1) проверена методами цифрового моделирования. При моделировании учитывались характерные для датчиков углов и угловых скоростей (и ряда других элементов системы) ограничения вида зон нечувствительности и насыщений. Пример функционирования системы при отработке ненулевых начальных условий и действующем возмущении постоянного знака в случае использования только плечевого ($M_{\alpha 1}$) привода манипулятора приведен на рис. 4.

При моделировании было принято:

$$\vartheta_0 = 0,02 \text{ рад}, \dot{\vartheta}_0 = 0,01 \text{ рад/с}; \alpha_1(0) = 0,45 \text{ рад};$$

$$u_{9,\alpha} = k_1 \dot{\vartheta} + \vartheta, k_1 = 8 \text{ с}; M_d^9 = 0,02 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{9,\alpha} = \begin{cases} k u_{9,\alpha} a t |u_{9,\alpha}| \geq u_{9,\alpha \min}; \\ 0 a t |u_{9,\alpha}| < u_{9,\alpha \min}; \end{cases}$$

$$k = 5, |\alpha| \leq \alpha_{\max} = 0,5 \text{ рад}, |\dot{\alpha}| \leq \dot{\alpha}_{\max} = 0,07 \text{ рад/с}.$$

Из осциллограмм видно, что управление угловой координатой ϑ ($\vartheta_0, \dot{\vartheta}_0 \rightarrow 0$) с помощью управления $M_{\alpha 1}(u_{9,\alpha})$, вызвавшего наблюдаемое на средней осциллограмме движение манипулятора $\alpha_1(t)$ в пределах допустимых ограничений, позволило на рассматриваемом интервале времени наблюдения избежать срабатывания реактивных двигателей основной системы ориентации КМР, т. е. реализовать легко определяемую экономию расходуемого запаса топлива.

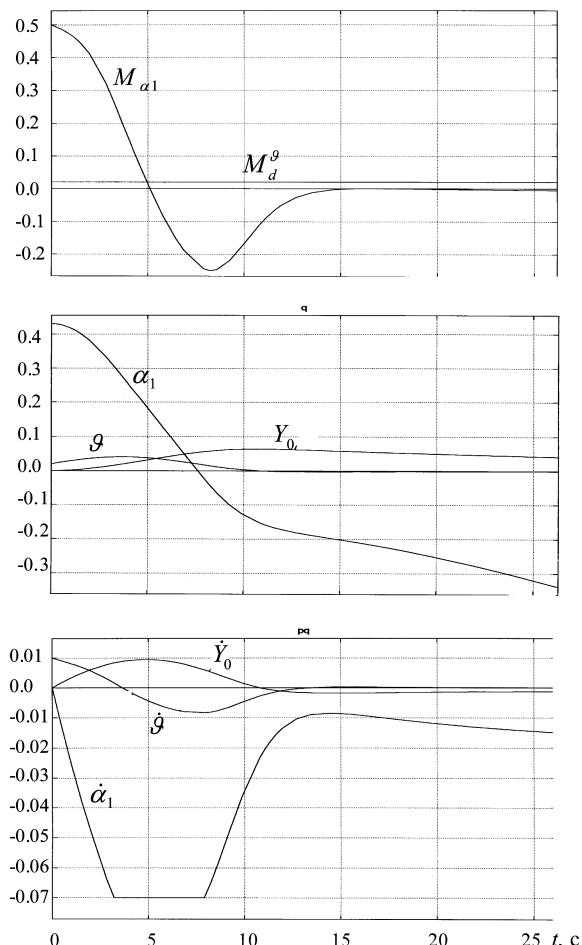


Рис. 4. Переходные процессы при комбинированном управлении

Решение некоторых проблем транспортировки нежесткого груза

Упругость транспортируемого с помощью КМР груза, в простейшем случае учтенная на рис. 1 двумя дополнительными степенями свободы q_3, q_4 , может явиться причиной ухудшения динамических свойств КМР как объекта управления вплоть до потери устойчивости из-за раскачки колебаний груза, ведущей к захвату регулятора упругими колебаниями. Чтобы не допустить этого, необходимо в алгоритмах управления КМР иметь информацию о координатах колебаний q_3, q_4 , которые, как правило, являются неизмеряемыми. Для получения оценок координат упругих колебаний конструкции и идентификации их параметров, а также для синтеза алгоритмов управления удобно использовать модально-физическую модель (МФМ) описания динамики КМР с учетом упругости конструкции (груза).

◆ Алгоритм преобразования лагранжевой модели КМР в модально-физическую модель (МФМ)

В кратком изложении рассмотрим процедуру получения МФМ динамики КМР в режиме транспортировки нежесткого груза [13].

В общем случае динамика КМР, в том числе с учетом упругости груза, может быть описана известными уравнениями Лагранжа второго рода, представленными в следующем виде:

$$A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Bq = Q, \quad (8)$$

где $A(q)$ — матрица инерций системы; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ — нелинейная вектор-функция кориолисовых и центробежных сил; B — матрица жесткостей; Q — вектор обобщенных сил; $q = (q^0, q^\alpha, q^\sim)^T$ — вектор обобщенных координат, элементами которого являются: $q^0 = (Y_0, X_0, \vartheta)^T$ — подвектор координат несущего тела КМР, $q^\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^T$ — подвектор координат манипулятора, q^\sim — подвектор координат упругих деформаций груза.

При транспортировке груза звенья манипулятора фиксированы относительно корпуса КМР, т. е. $q^\alpha = \bar{q}^\alpha = \text{const} \rightarrow \dot{q}^\alpha, \ddot{q}^\alpha \equiv 0$, а вариации координат векторов q^0 и q^\sim ограничены и малы. Это позволяет линеаризовать (8) до уравнения вида

$$A\ddot{q} + Bq = Q, \quad (9)$$

где $q = (q^0, q^\sim)^T$ — вектор обобщенных координат пониженной размерности; A, B — квадратные симметричные матрицы с постоянными коэффициентами.

Описанная уравнениями (9) связка объектов КМР-Г по существу является колебательной многочастотной механической системой. По этой причине уравнения (9) могут быть преобразованы в модально-физическую форму. Такое преобразование возможно, если уравнения (8) допускают разделе-

ние общего движения КМР-Г на две независимые подсистемы, одна из которых описывает траекторное, а другая — угловое движение связки КМР-Г. В режиме транспортировки нежесткого груза условия допустимости раздельного описания движений обычно сохраняются, что позволяет записать уравнения углового движения связки в виде [13]

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{q}^\sim \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ q^\sim \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $x = (\vartheta, \varphi, \psi)^T$ — вектор углов Эйлера, определяющих ориентацию корпуса КМР; $A_{ij}(i, j = 1, 2)$ — блочные элементы матрицы A .

Уравнение (10) далее может быть преобразовано в форму МФМ. Алгоритм такого преобразования содержит два этапа:

1) переход от (10) к нормальным координатам [13], расслаивающим общее движение КМР-Г на отдельные моды;

2) окончательное преобразование нормальных координат в удобный с инженерной точки зрения базис, позволяющий придать более наглядный (физический) смысл отображению движений, существующих в свободно перемещающейся колебательной механической системе.

В [13] показано, что система (7) эквивалентна системе уравнений

$$\{\ddot{\tilde{s}} = RQ, \ddot{\tilde{s}} + \omega^2 \tilde{s} = HQ, x = R\bar{s} + H^T \tilde{s}\}, \quad (11)$$

где $\bar{s} \in R^3, \tilde{s} \in R^n$ — векторы нормальных координат; $R = A_{11}^{-1/2}; \omega^2 = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2)$ — диагональная матрица; $a = A_{22} - A_{12}^T A_{11}^{-1} A_{12}; H = -Ta^{-1/2} A_{12}^T A_{11}^{-1}; T^T a^{-1/2} B_{22} a^{-1/2} T = \omega^2$.

Если координаты вектора $x = (x^1, x^2, x^3)^T$ доступны измерению, то для целей исследования динамики КМР-Г как объекта управления и для ряда других задач систему уравнений (11), записанную в нормальных координатах \bar{s}, \tilde{s} , удобнее представить в следующем виде:

$$\{\ddot{\tilde{x}} = \bar{N}Q, \ddot{\tilde{x}} + \omega^2 \tilde{x} = HQ, x = \bar{x} + \tilde{x}, \tilde{x} = H^T \tilde{s}\}, \quad (12)$$

где $\bar{N} = R^2; \bar{x} = R\bar{s}; \bar{x} = (\bar{x}^1, \bar{x}^2, \bar{x}^3)^T; H = (h_{ik}), (i = \overline{1, n}; k = \overline{1, 3})$.

При решении задач, связанных с синтезом управления ориентацией упругого объекта типа КМР-Г, описываемого уравнениями (12), для случая трехканального управления представляется целесообразным ввести в рассмотрение модель, отображающую пространственное движение КМР-Г в виде проекции $x^v, v = (1, 2, 3)$ на любую из трех плос-

костей движения (т. е. по каждой из координат вектора x , связанного с корпусом КМР):

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\bar{x}}^v = \bar{k}^v m(u); \\ \ddot{\tilde{x}}^v + \omega^2 \tilde{x}^v = \tilde{K}^v m(u); \quad \tilde{x}^v = (\tilde{x}_1^v, \tilde{x}_2^v, \dots, \tilde{x}_n^v)^T; \\ x^v = \bar{x}^v + \tilde{x}_{\Sigma}^v; \quad \tilde{x}_{\Sigma}^v = \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^v, \quad v = \overline{1, 3}. \end{array} \right. \quad (a), (b), (c) \quad (13)$$

Здесь \bar{x}^v описывает движение, имеющее место вследствие перемещения связки КМР-Г как жесткого объекта; \tilde{x}_{Σ}^v определяет дополнительные изменения координаты x^v , вызванные воздействием колебаний упругой конструкции на корпус КМР; k^v — v -я строка матрицы $\bar{K} = (\bar{k}^{vk})$, ($v, k = \overline{1, 3}$; $\bar{K} = \bar{N} I$) коэффициентов влияния управляющего воздействия на движение \bar{x}^v по собственному (\bar{k}^{vv}) и перекрестным ($\bar{k}^{vk}, v \neq k$) каналам управления; $\tilde{K}^j = \text{diag}(h_{1v}, h_{2v}, \dots, h_{nv}) H I$; $\tilde{K}^v = (\tilde{k}_i^{vk})$, ($v, k = \overline{1, 3}; i = \overline{1, n}$) — матрица коэффициентов возбудимости упругих мод КМР-Г по собственному (\tilde{k}_i^{vv}) и перекрестным ($\tilde{k}_i^{vk}, v \neq k$) каналам; $m(u) = I^{-1} Q$; $m(u) = (m^1, m^2, m^3)^T$; $I = \text{diag}(I_{11}, I_{22}, I_{33})$, где I_{vv} ($v = 1, 2, 3$) — главные моменты инерции КМР-Г.

Уравнения (13) представляют собой модально-физическую модель пространственного углового движения упругой связки КМР-Г в проекции на плоскость v , которая используется далее в задачах оценивания МФ-координат и ряда других задач, связанных с синтезом алгоритмов управления угловым движением модуля с нежестким грузом. При решении конкретных задач на плоскости индекс v в (13) далее опускается.

Модально-физическая форма математической модели КМР является весьма удобной как в задаче оценивания координат упругого движения КМР, так и для синтеза закона управления движением объекта с нежесткими элементами конструкции.

◆ Оценивание МФ-координат

Как видно из (13), математическая модель свободно летающих КМР с нежестким грузом содержит две группы переменных, одна из которых описывает движение упругого объекта как в целом жесткого тела $\bar{x}(t)$ ("жесткое" движение КМР), другая группа переменных определяет дополнительное движение корпуса КМР $\tilde{x}(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i(t)$, возникающее

из-за упругих колебаний конструкции объекта. Эта часть движения аппроксимируется группой диф-

ференциальных уравнений (13b), каждое из которых соответствует колебательному звену, и в силу отсутствия специализированных датчиков является неизмеряемой. Однако для обеспечения требуемого качества управления движением КМР часто возникает необходимость иметь информацию об указанных координатах упругого движения и, по крайней мере, о частотах и коэффициентах возбудимости упругих мод объекта.

В связи с этим в [14–16] рассмотрены задачи оценивания на основе теории фильтрации с применением дискретного расширенного фильтра Калмана как параметров математической модели КМР с удерживаемым им упругим грузом, так и самих МФ-координат упругих колебаний такого класса механических систем.

В основном указанные задачи идентификации и наблюдения рассматривались на основе использования модально-физической формы описания динамики плоского углового движения объектов с упругой конструкцией (13), представленной в виде, в котором учитывается стохастическая природа шумов на входе объекта и измерений:

$$\dot{X} = A(Y)X + B(Y)u + CW, \quad \dot{Y} = F(t)Y, \quad (14)$$

где $X = (x_1, \dots, x_{2n+2})^T$ — текущий вектор координат движения КМР; $Y = (y_1, \dots, y_{2n})^T$ — текущий вектор параметров КМР; $u = u(x_1, x_2)$ — управление, формируемое алгоритмом угловой стабилизации; $W(t) = (w_1, \dots, w_{n+1})^T$ — вектор шумов; $x_1 = \bar{\vartheta}$ — угол поворота корпуса при условии, что груз является жестким телом; $x_2 = \dot{\bar{\vartheta}}$; $x_{2i+1} = \tilde{\vartheta}_i$ — дополнительное изменение угла поворота, вызванное изгибными колебаниями груза; $x_{2i+2} = \dot{\tilde{\vartheta}}_i$; $y_i = \tilde{\omega}_i$ — собственные частоты КМР; $y_{n+i} = \tilde{k}_i$ — коэффициенты возбудимости соответствующих упругих мод; n — число учитываемых мод. Выражения для матриц $A(Y)$, $B(Y)$, C приведены, например, в [15].

Вектор измерения описывается уравнением

$$Z = HX + V, \quad (15)$$

где $Z = (z_1, z_2)^T$; $V(t) = (v_1, v_2)^T$ — вектор шумов измерителей; $H = [\dots, H_i, \dots]^T$; $H_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. При синтезе алгоритма оценивания МФ-координат движения и параметров КМР с упругим грузом уравнения (14), (15) представляются в дискретной форме в виде системы уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \Phi_{k+1}(Y)X_k + \Gamma_{k+1}(Y)u_k + \psi_{k+1}(Y)W_k; \\ Y_{k+1} &= Y_k = Y; \end{aligned} \quad (16)$$

$$Z_k = HX_k + V_k, \quad k = \overline{0, n-1}, \quad (17)$$

где $\Phi_k(Y)$, $\Gamma_k(Y)$, $\psi_k(Y)$ — матрицы соответствующих размерностей.

В общем случае система уравнений (16) относительно вектора $(X^T, Y^T)^T$ является нелинейной. Однако, если зафиксировать параметры вектора Y , уравнения (16) сводятся к линейным относительно вектора X_k . Тогда для совместного оценивания векторов X_k и Y представляется возможным использовать комбинированные алгоритмы, объединяющие дискретную калмановскую фильтрацию и теорию проверки статистических гипотез [17].

Если в качестве гипотез $(D_j, j = \overline{1, l})$ используется набор конкретных значений параметров Y , т. е. $D_j = (y_1^j, \dots, y_s^j, \dots, y_{2n}^j)^T$, то задача оптимального оценивания векторов X_N и Y_j по измерениям (15) сводится к решению следующих групп уравнений [15]:

- уравнений оценок

$$\begin{aligned}\hat{X}_{jk+1} &= \Phi_{jk+1} \hat{X}_{jk} + \partial_{jk+1} u_k + K_{jk+1} \Delta_{jk+1}; \\ \Delta_{jk+1} &= Z_{k+1} - H(\Phi_{jk+1} \hat{X}_{jk} + \partial_{jk+1} u_k); \\ K_{jk+1} &= \bar{P}_{jk+1} H^T (H \bar{P}_{jk+1} H^T + R)^{-1};\end{aligned}\quad (18)$$

- уравнений ковариационных матриц

$$\begin{aligned}\bar{P}_{jk+1} &= \Phi_{jk+1} P_{jk} \Phi_{jk+1}^T + \Psi_{jk+1} Q \Psi_{jk+1}^T; \\ \bar{P}_{jk+1} &= \bar{P}_{jk+1} - \\ &- \bar{P}_{jk+1} H^T (H \bar{P}_{jk+1} H^T + R)^{-1} H \bar{P}_{jk+1};\end{aligned}\quad (19)$$

- уравнений функционалов

$$\begin{aligned}I_{jk+1} &= I_{jk} + \Delta_{jk+1}^T \sum_{jk+1}^{-1} \Delta_{jk+1} + \varepsilon_{jk+1}; \\ \sum_{jk+1}^{-1} &= [E - (H \bar{P}_{jk+1} H^T + R)^{-1} \times \\ &\times H \bar{P}_{jk+1} H^T] (H \bar{P}_{jk+1} H^T + R)^{-1}; \\ \varepsilon_{jk+1} &= \ln(|\bar{P}_{jk+1}| \|H \bar{P}_{jk+1} H^T + R\| / |P_{jk+1}|).\end{aligned}\quad (20)$$

Уравнения (18)–(20) являются алгоритмом вычисления конечных значений функционалов I_{jN} , по которым в качестве наиболее вероятной выбирается гипотеза D_v (соответствующая вектору \hat{Y}_v),

минимизирующая функционал I_{jN} , а оценка \hat{X}_{vN} , соответствующая этой гипотезе, является оптимальной оценкой вектора состояния X_N .

Синтезированные в [14–16] алгоритмы оценивания, включая рассмотренный алгоритм (18–20), с достаточно высокой точностью обеспечивают по-

лучение в реальном времени параметров и МФ-координат модели КМР в режиме транспортировки нежестких грузов, что подтверждено моделированием большого числа примеров.

Управление ориентацией КМР в режиме транспортировки нежесткого груза

В режиме транспортировки с помощью КМР положения звеньев манипулятора чаще всего остаются неизменными. В этом случае КМР можно рассматривать как деформируемый космический аппарат, параметры которого зависят от размеров, массы и упругих свойств переносимых грузов, в силу различия которых коэффициенты модели КМР-Г и ее размерность являются переменными и нередко плохо определены. По этой причине система управления угловым движением КМР должна обладать свойством адаптации.

Ранее авторами были предложены три типа адаптивных систем управления космическими аппаратами с учетом нежесткости их конструкции, которые в принципе могут быть использованы при проектировании систем ориентации КМР в режиме транспортировки нежестких грузов. Рассмотрим их в кратком изложении.

♦ Управление на основе методов интеллектуальной диагностики

Первый из подходов [18] предполагает использование методов интеллектуальной диагностики состояния упругой компоненты движения $\tilde{x}(t)$, определяемого через понятие интенсивности упругих колебаний, возбуждаемых при управлении основным ("жестким") движением КМР-Г на интервале наблюдения τ_Γ :

$$I_\Gamma = \|\tilde{x}\| = \frac{1}{\tau_\Gamma} \left[\int_0^{\tau_\Gamma} \tilde{x}^2(t) dt \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Физически норму I_Γ можно рассматривать как усредненную на периоде τ_Γ амплитуду многочастотного колебательного процесса $\tilde{x}(t) = \sum \tilde{x}_i(t)$.

Определение. Состояние управляемого подвижного объекта, имеющего ограниченную жесткость конструкции ($\omega_i^2 \neq \infty$), является нормальным, если его основное движение устойчиво и удовлетворяет установленным требованиям качества, а интенсивность колебаний его конструкции (21) не превышает некоторого наперед заданного значения $I_{\Gamma \text{ доп}}$, определяемого из условия недопустимости захвата регулятора упругими колебаниями.

Из данного определения следует, что состояние, при котором реализуется условие

$$I_\Gamma(t) \geq I_{\Gamma \text{ доп}} \forall t \geq 0, \quad (22)$$

следует рассматривать как неисправное состояние управляемого упругого объекта.

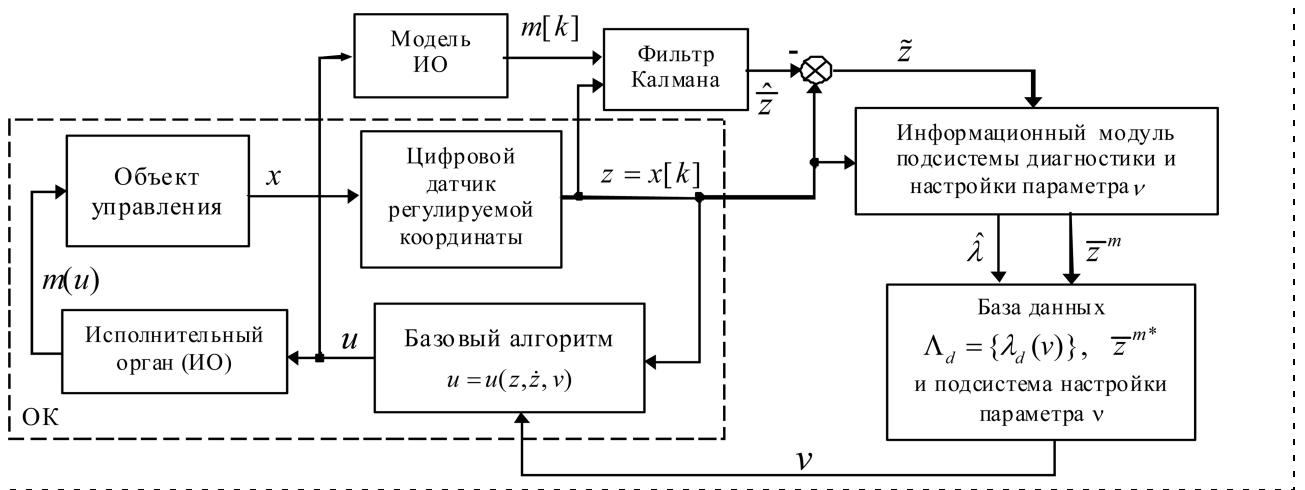


Рис. 5. Схема адаптивной системы управления подвижным упругим объектом

Основной задачей интеллектуальной диагностики является распознавание состояния управляемого объекта в условиях ограниченной информации, вызванной отсутствием датчиков упругих колебаний конструкции. Необходимым этапом решения этой задачи является построение априорной концептуальной модели процесса изменения интенсивности $I_{\Gamma}(t)$ упругой компоненты, совершающейся под влиянием базового управления КМР-Г. Методика формирования такой концептуальной модели подробно изложена в [18].

Оценка интенсивности доминирующей моды, вычисляемая как средняя составляющая \bar{z}^m элементов массива Z_m локальных максимумов выпрямленного сигнала измерений, позволяет оценить степень интенсивности колебательного процесса и, выступая показателем исправности системы, используется в качестве одного из управляющих сигналов в контуре самонастройки параметра v алгоритма базового управления. Другим информационно-управляющим сигналом контура адаптации является формируемая известным образом [18] оценка $\hat{\lambda}$ показателя экспоненты $e^{-\lambda t}$, моделирующей квазиогибающую переходного процесса. Обобщенная схема подобной адаптивной системы управления упругим подвижным объектом приведена на рис. 5.

♦ Управление с использованием оценок фаз доминирующей моды

В основе адаптивной системы второго типа лежит рассмотренный в [19, 20] способ управления ориентацией упругого объекта с использованием оценок фазовых значений доминирующей моды в моменты переключения исполнительного органа при базовых алгоритмах управления релейного (или дискретного) типа.

В [19] показано, что характер изменения амплитуды упругих колебаний определяется совокупностью состояний системы в моменты переключения

системы, т. е. амплитуда наблюдаемой упругой моды $\tilde{A}_k = \tilde{A}(t_k)$ может либо увеличиться, либо уменьшиться по сравнению с \tilde{A}_{k-1} в зависимости от направления переключения ($\text{sign } \dot{m}(t_k)$) и от значения фазы β_k в рассматриваемый момент переключения t_k . В частности, оптимальные по фазе условия переключения управления являются реализованными при таком состоянии системы, при котором амплитуда относительных колебаний ρ_k после переключения регулятора будет наименьшей из всех возможных для заданного направления переключения $\text{sign } \dot{m}(t_k)$. При этом условия оптимального переключения могут быть определены в следующем виде:

$$\beta_k = \begin{cases} 2\pi n & \forall \text{sign } \dot{m}(t_k) = +1; \\ \pi(2n+1) & \forall \text{sign } \dot{m}(t_k) = -1, n = 0, 1, 2, \dots. \end{cases} \quad (23)$$

Пусть $\bar{u} = f_0(y, t)$ — базовый алгоритм, в котором $y \doteq \bar{x} + \tilde{x}$. Тогда расширенным законом управления ориентацией КА $u = f_1(\bar{u}, \beta_d)$ назовем базовый алгоритм, дополненный сигналом, содержащим информацию о фазе β_d доминирующей моды $\tilde{x}_d(t)$. Точки переключения управления называются фазоуправляемыми, если момент t_j переключения управляющего воздействия в этих точках зависит не только от выполнения необходимых условий, удовлетворяющих базовому алгоритму, но и от фазы β_d . При этом направление переключения $\text{sign } \dot{m}(u)$ однозначно определяется в соответствии с требованиями базового алгоритма, а момент переключения совпадает во времени с моментом появления оптимальной по признаку (23) фазы упругих колебаний.

Таким образом, суть подхода к управлению ориентацией в данном случае заключается в формировании временных задержек на включение управляющего воздействия до момента появления оптимальной фазы, при которой данное воздействие окажется стабилизирующим по отношению к доминирующей моде. Информацию о текущем значении фазы доминирующей моды можно получать на основе оценивания МФ-координат упругой части движения с помощью фильтра Калмана [14]. Пример компьютерной реализации процесса управления ориентацией КМР с упругим грузом при использовании описанного подхода иллюстрируется осциллограммами на рис. 6 (см. третью сторону обложки). При отключенном контуре подсистемы управления задержкой ($t \leq t_1 = 220$ с) управляющие воздействия $m[u_0]$ основного контура системы ориентации вызывают увеличение амплитуды доминирующей моды до значений $\tilde{A}_d \approx 1,25 \cdot 10^{-3}$ рад, близких к критическому.

Для предотвращения развития процесса захвата регулятора при $t_1 = 220$ с был введен в действие алгоритм фазового управления ориентацией. Как видно из осциллограмм на рис. 6, реализация такой стратегии управления (использование задержек τ_b отражено на осц. 2 затенением интервалов ожидания оптимальных фаз) привела в итоге к снижению амплитуды колебаний доминирующей моды до исходного уровня без дополнительных затрат энергии.

- ◆ **Система ориентации КМР, использующая возможность манипуляционного изменения координаты точки захвата упругого груза**

В режиме стабилизации углового положения КМР-Г при транспортировке упругого груза почти периодическую функцию управления $m[u(t)]$ можно разложить в сходящийся ряд Фурье $f(t) =$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\Omega_0 t + \varphi_k).$$

Замена в правой части урав-

нений (13, b) управления $m[u(t)]$ на $f(t)$ приводит к задаче о вынужденных колебаниях i -го упругого осциллятора под влиянием множества приложенных к нему синусоидальных воздействий, частотный спектр которого $\Omega_k = k\Omega_0$ определен рядом Фурье. При совпадении хотя бы одной частоты этого спектра $\Omega_k = k\Omega_0$ с собственной частотой ω_i в системе, описываемой уравнениями (13), возникает резонанс, недопустимый для рассматриваемого класса объектов из-за возможности захвата регулятора упругими колебаниями с последующей потерей устойчивости системы в целом. Для разведения резонансных (или близко расположенных) мод с частотами ω_i, Ω_k в этом случае можно применить управляемое воздействие на собственные частоты связки тел КМР-Г путем манипуляционного изменения координаты r_s точки захвата s упругого груза манипулятором.

В [21] рассмотрена задача синтеза оптимального управления угловым движением КМР в режиме транспортировки нежесткого груза с учетом возможности изменения точки захвата груза. Очевидно, чтобы не допустить резонансной раскачки гибкого груза в процессе его транспортировки, необходимо обеспечивать такое положение схвата манипулятора на оси груза, при котором выбранное значение r_s^* было бы достаточно удалено из окрестности резонансных состояний системы, т. е. от точек пересечения зависимостей $\Omega_k(r_s)$ и $\omega_i(r_s)$.

Решение задачи синтеза оптимального управления гибкой связкой КМР-Г сводится к построению [21] на интервале допустимого изменения координаты точки захвата груза r_s многоэкстремальной функции

$$A_{b\max}(r_s) = \{A_{b\max}^{(k,i)}[\omega_i(r_s), \Omega_k]\} = \frac{\tilde{k}_i A_k(\omega_i + \Omega'_k)}{\omega_i(\omega_i^2 - \Omega_k^2)},$$

$$\text{где } \Omega'_k = \Omega_k + \frac{\omega_i^2 - \Omega_k^2}{A_l} \sum_{j=1, j \neq l}^n \frac{A_j \Omega_j}{\omega_i^2 - \Omega_j^2}, \quad (24)$$

и последующего поиска глобального минимума на множестве локальных:

$$\lambda_{r_s^{\min \min}}^{(k,i)} = \min_{r_s^* \in (0, l)} \lambda_{r_s^{\min}}^{(k,i)}. \quad (25)$$

Из (24) видно, что при известных значениях параметров упругой связки КМР-Г и регулятора функция $A_{b\max}(r_s)$, представляющая собой максимальное значение переменной амплитуды биения, является заданной. В этом случае решение задачи (25) методами вычислительной математики позволяет выявить оптимальное значение $r_s = r_s^*$, при котором процесс стабилизации осей связки КМР-Г сопровождается минимальным возбуждением упругих колебаний транспортируемого груза (рис. 7). Обозначенные на рисунке импульсные функции $C_{k,i}$ определяют степень опасности любого из резонансов $R_{k,i}$, ко-

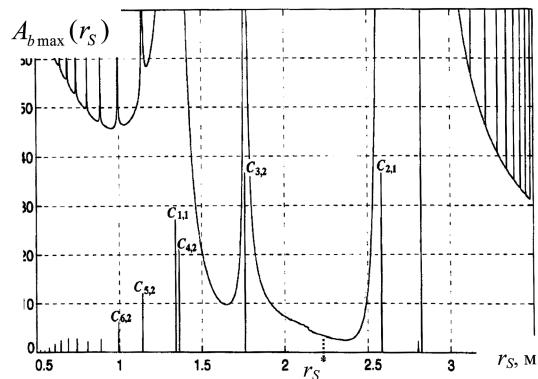


Рис. 7. Резонансы и зависимость максимальной амплитуды биений от параметра захвата груза

торая характеризуется скоростью нарастания амплитуды резонансной моды: $\tilde{x}_{k,i} = C_{k,i} t \cos(\omega_i t)$ при $\omega_i = \Omega_k$ и может быть определена величиной $C_{k,i} = 0,5 A_k \tilde{k}_i \omega_i^{-1}$ [20].

Заключение

Космический манипуляционный робот является перспективным объектом будущей космонавтики. В настоящее время, насколько известно авторам, еще ни в одной стране не ведутся работы по их производству или проектированию. Однако теоретические исследования с каждым годом приобретают все большие масштабы и значение.

В данной работе авторы постарались осветить некоторые достаточно важные вопросы теории систем управления КМР, которые неизбежно возникнут при разработке различных подсистем управления на множестве режимов функционирования космического свободнолетающего манипуляционного робота.

Список литературы

1. Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. I // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 52–59.
2. Papadopoulos E., Dubowsky S. On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators // IEEE Trans. Robot. Autom. 7 (6). 1991. P. 750–758.
3. Moosavian S. Ali A., Papadopoulos E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // J. Robotica. 25 (5). 2007. P. 537–547.
4. Torres M., Dubowsky S. Path planning for space manipulators to minimize spacecraft attitude disturbance // Proc. 1991 IEEE Int. Conf. Robotics Automat (Sacramento, CA). 1991. V. 3. P. 2522–2528.
5. Longman R., Lindberg R., Zedd M. Satellite-mounted robot manipulators — new kinematics and reaction moment compensation // Int. J. Robotics Res. 1987. V. 6. N 3. P. 87–103.
6. Vafa Z., Dubowsky S. The kinematics and dynamics of space manipulators: The virtual manipulator approach // Int. J. Robotics Res. 1990. V. 9. N 4. P. 3–21.
7. Богомолов В. П., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта автоматического управления. I, II // АиТ. 1998. № 5. С. 27–40. № 6. С. 75–88.
8. Глумов В. М., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Особенности управления перелетами космического роботизированного модуля вблизи поверхности орбитальной станции. I, II // Изв. РАН. ТиСУ. 2002. № 2. С. 162–169. № 3. С. 140–148.
9. Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Управление посадкой космического робота на орбитальную станцию из режима "зависания" // Сб. трудов XI международного научно-технического семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации". Алушта. Сентябрь 2002. М.: Изд. МАИ. С. 291–296.
10. Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М. Управление движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // АиТ. 2010. № 1. С. 80–98.
11. Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M., Zemlyakov S. D., Kirchhoff U. Nonlinear combined control by Space Robotic Module motion with using manipulator's mobility // Proceedings of the 15-th IFAC World Congress. Spain, Barcelona. 2002.
12. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. М.: Машиностроение, 1977.
13. Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и ее свойства // АиТ. 1998. № 12. С. 38–50.
14. Борисов В. Г., Ермилов А. С., Ермилова Т. В., Суханов В. М. Совместное оценивание координат и параметров космического робототехнического модуля и переносимого им упругого груза // АиТ. 2002. № 11. С. 99–113.
15. Борисов В. Г., Ермилов А. С., Ермилова Т. В., Суханов В. М. Совместное оценивание и идентификация в дискретных системах управления нежесткими космическими аппаратами // Тр. II Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'03), Москва, 2003. С. 2278–2284.
16. Ермилов А. С., Ермилова Т. В., Суханов В. М. Использование высших мод упругого объекта в качестве шума при решении задачи дискретного оценивания МФ-координат его углового движения // Тр. V Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'06), Москва, 2006. С. 2383–2392.
17. Белоглазов И. Н., Ермилов А. С., Карпенко Г. И. Рекуррентно-поисковое оценивание и синтез алгоритмов корреляционно-экстремальных навигационных систем // АиТ. 1979. № 7. С. 68–79.
18. Глумов В. М., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Использование методов интеллектуальной диагностики в задаче управления подвижными объектами с нежесткой конструкцией // АиТ. 2007. № 12. С. 3–20.
19. Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Об устойчивости рельефных систем управления ориентацией деформируемых спутников // Тр. IV Междунар. симп. ИФАК по автоматическому управлению в пространстве. Сб. Управление в пространстве. Т. 1. М.: Наука, 1973. С. 37–43.
20. Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Исследование динамики взаимодействия упругих колебаний конструкции с системой управления деформируемого космического аппарата методом фазовой биплоскости // АиТ. 2007. № 2. С. 49–62.
21. Глумов В. М., Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Суханов В. М. Управление угловым движением космического роботизированного модуля в режиме транспортировки нежесткого груза // АиТ. 2001. № 11. С. 121–135.

ИНФОРМАЦИЯ

Весной 2011 г. в Санкт-Петербурге на базе ОАО "Концерн "Электроприбор" состоятся конференции:

- ◆ с 1 по 4 марта XIII конференция молодых ученых "Навигация и управление движением (XIII КМУ 2011)";
- ◆ с 30 мая по 1 июня Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам.

*Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://www.elektropribor.spb.ru/rufset/html>*

В. В. Матвеев, канд. техн. наук, доц.,
В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
В. В. Лихошерст, канд. техн. наук, доц.,
 Тульский государственный университет
 tgupu@yandex.ru

Система ориентации беспилотного летательного аппарата с каналом видеонаблюдения*

Обсуждаются системы ориентации и навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), построенные на базе микромеханических гироскопов (ММГ) и акселерометров (ММА), особенностью которых является обединение механических элементов, система съема и обработки информации в одном кремниевом чипе. Рассматривается задача коррекции инерциальных систем ориентации и навигации БПЛА. Исследуется возможность коррекции бесплатформенной системы ориентации БПЛА за счет средств видеонаблюдения.

Ключевые слова: бесплатформенная система ориентации, беспилотный летательный аппарат, микромеханический гироскоп, видеокамера

Принцип работы и особенности работы бесплатформенной системы ориентации на микромеханических гироскопах

Бесплатформенная система ориентации (БСО) беспилотного летательного аппарата (БПЛА) служит для определения углового положения БПЛА

относительно опорной системы координат. В качестве опорной системы координат наиболее часто применяется географическая система координат $OX_gY_gZ_g$, центр которой помещается в центр масс БПЛА, а ее оси направлены по странам света на север, по вертикали вверх и на восток соответственно. Географическая система координат вращается в инерциальном пространстве с угловой скоростью, вызванной суточным вращением Земли U и угловыми скоростями изменения широты ϕ и долготы λ , обусловленными перемещением летательного аппарата (ЛА) относительно сферической поверхности Земли (рис. 1, a).

На основании рис. 1, a проекции вектора абсолютной угловой скорости географической системы координат на ее оси представим в виде [1]

$$\left. \begin{aligned} \omega_{X_g} &= (U + \dot{\lambda})\cos\phi = U\cos\phi + \frac{V_{Z_g}}{R}; \\ \omega_{Y_g} &= (U + \dot{\lambda})\sin\phi = U\sin\phi + \frac{V_{Z_g}\operatorname{tg}\phi}{R}; \\ \omega_{Z_g} &= -\dot{\phi}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R — радиус земного шара, V_{Z_g} — восточная составляющая линейной скорости ЛА, ϕ — широта, λ — долгота.

С математической точки зрения задача ориентации БПЛА относится к проблемам, связанным с вращательным движением материальных тел вокруг центра масс. Еще Л. Эйлер показал, что произвольное перемещение твердого тела вокруг непод-

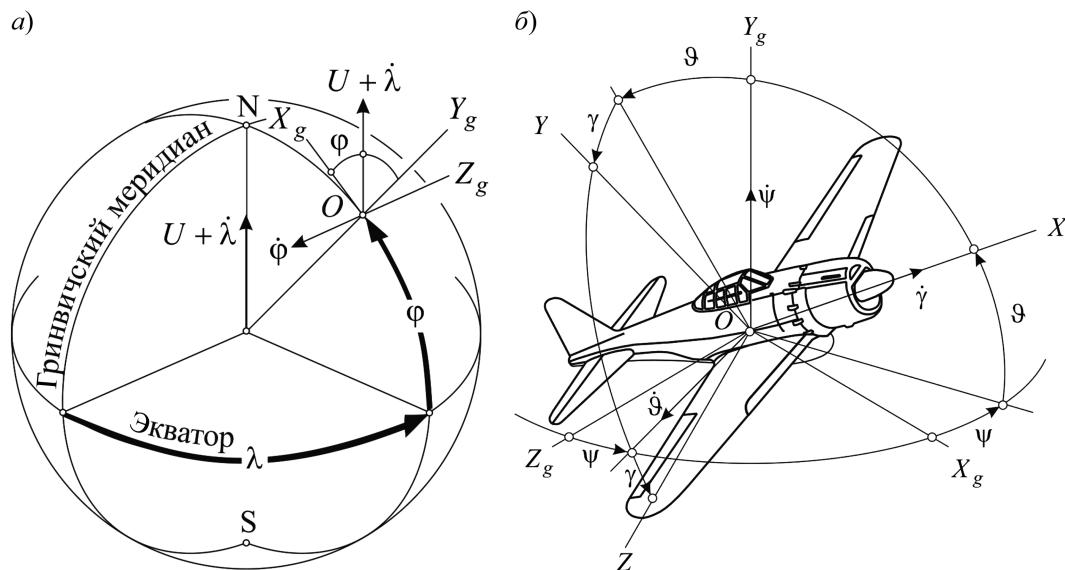


Рис. 1. Географическая и связанная с ЛА системы координат:

а — положение географической системы координат относительно Земли; б — взаимное положение географической и связанной систем координат

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-08-00891 "Концепция построения и проектирования авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов".

вижной точки можно осуществить тремя последовательными вращениями тела вокруг трех осей, проходящих через неподвижную точку. Если связать с БПЛА систему координат $OXYZ$ (так называемая связанная система координат), ось OX которой направлена по продольной оси ЛА, OY — в вертикальной плоскости симметрии вверх, а OZ — в сторону правого крыла, то ее положение относительно географической системы координат можно задать тремя углами Эйлера—Крылова ψ , ϑ и γ . Применимельно к БПЛА углы Эйлера—Крылова называют соответственно углами рыскания ψ тангажа ϑ и крена γ (рис. 1, б). Знание углов ψ , ϑ и γ на борту ЛА решило бы задачу ориентации. Проекции вектора угловой скорости БПЛА на оси связанной системы координат имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\omega_X &= \dot{\psi} \sin \vartheta + \dot{\gamma}; \\ \omega_Y &= \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma; \\ \omega_Z &= -\dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma + \dot{\vartheta} \cos \gamma.\end{aligned}\quad (2)$$

В БСО отсутствует гиростабилизированная платформа, а гироскопические датчики первичной информации устанавливаются непосредственно на борту подвижного объекта. Информация с микромеханических гироскопов (ММГ) поступает в бортовую цифровую вычислительную машину, где интегрируются уравнения относительно кинематических параметров. В качестве кинематических параметров могут быть использованы углы Эйлера—Крылова, направляющие косинусы, параметры Родрига—Гамильтона, кватернионы и др. Наиболее часто в алгоритмах беспилотных систем ориентации и навигации используются параметры Родрига—Гамильтона, так как кинематические уравнения в параметрах Родрига—Гамильтона линейные, имеют невысокий порядок (четвертый) и работоспособны при любых углах ориентации [1].

Схема работы БСО приведена на рис. 2.

Три ММГ с взаимно ортогональными осями чувствительности вырабатывают проекции вектора аб-

солютной угловой скорости БПЛА ω_X , ω_Y , ω_Z на оси связанной системы координат. Из указанных проекций формируется гиперкомплексное отображение Ω вектора ω , которое поступает в блок решения кинематического уравнения в кватернионах:

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \Omega - \Omega_g \circ \Lambda, \quad (3)$$

где Λ — кватернион, характеризующий взаимную ориентацию связанной системы координат $OXYZ$ и географической $OX_g Y_g Z_g$. В этот блок также поступает отображение Ω_g , составленное из проекций вектора абсолютной угловой скорости географической системы координат на свои же оси. Отображение Ω_g учитывает факт суточного вращения Земли и переносную угловую скорость БПЛА, вызванную его перемещением вдоль сферической поверхности Земли. При небольшой продолжительности полета можно пренебречь вращением географической системы координат и положить $\Omega_g = 0$. Для запуска алгоритма вводится также начальный кватернион ориентации $\Lambda(t_0)$. Результатом решения кинематического уравнения (3) является кватернион Λ , который поступает в блок пересчета в углы Эйлера—Крылова.

Для исследования БСО на ММГ разработаны специальные программы моделирования в среде Matlab|Simulink, где реализовалась схема, приведенная на рис. 2.

Входными данными алгоритма служили записи ошибок микромеханических гироскопов ADXRS-150 фирмы Analog Devises (рис. 3) длительностью 180 с.

Предварительно оценивали смещение нуля и масштабные коэффициенты ММГ. После вычитания смещений нуля ошибки ММГ пропускали через алгоритмы БСО, что позволяло оценить работу последней в автономном режиме.

Из рис. 3, б можно заключить, что ошибки в определении параметров ориентации БПЛА имеют тенденцию к накоплению. В данной реализации наибольшую погрешность БСО имеет в определении угла тангажа (6°), по крену ошибка составляет

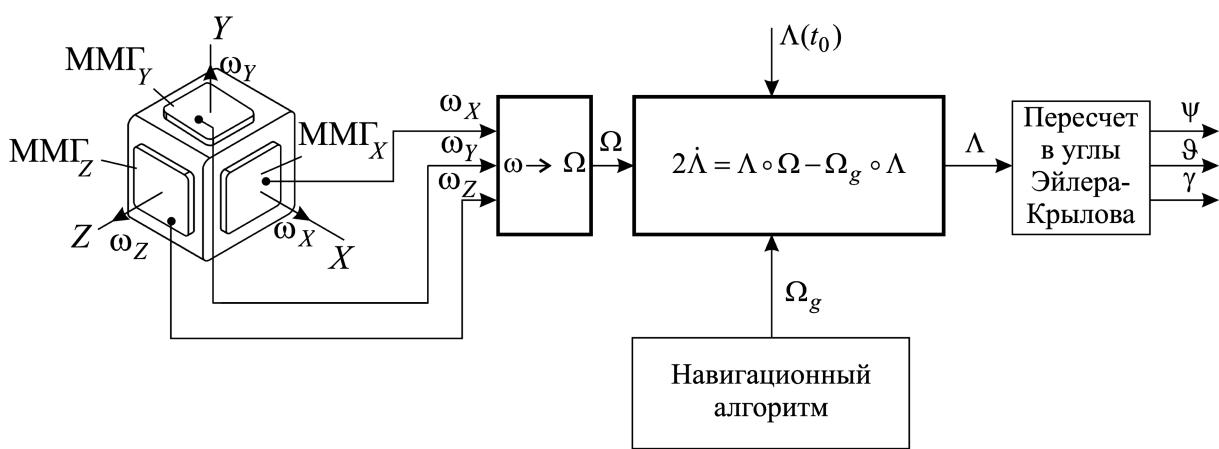


Рис. 2. Схема БСО

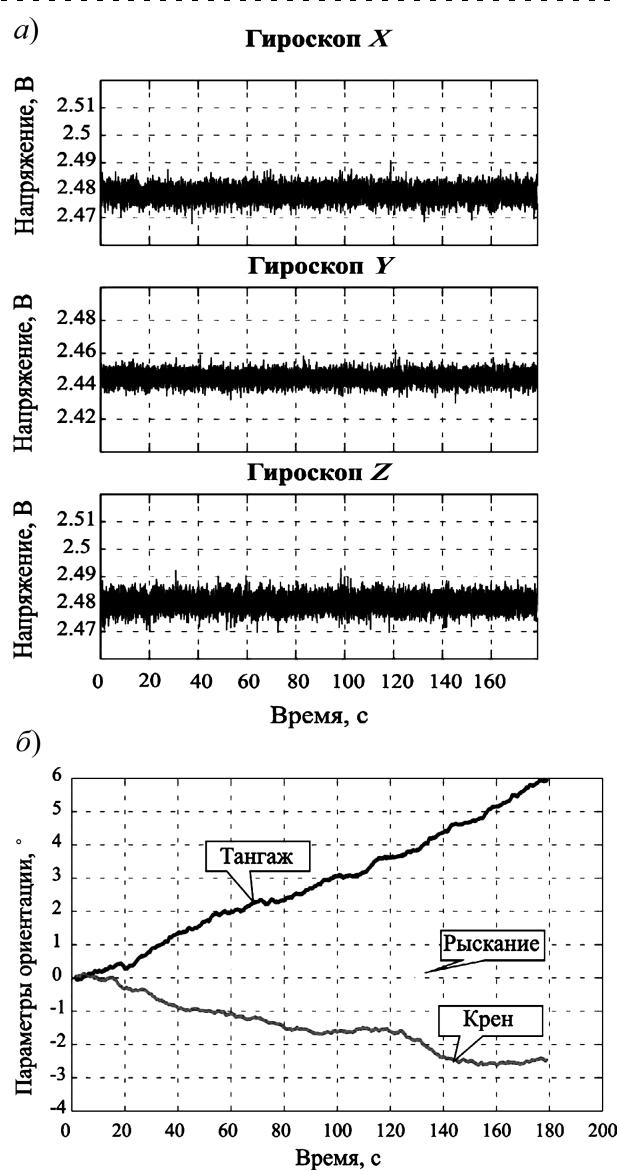


Рис. 3. Моделирование БСО на неподвижном основании:
а — выходные сигналы ММГ; б — уходы БСО

около $2,5^\circ$. Таким образом, для устранения накапливания ошибок необходимо корректировать БСО, что возможно за счет средств видеонаблюдения.

Комплексирование БСО и канала видеонаблюдения

Как известно, основной целевой задачей БПЛА является обзор местности и наблюдение за обстановкой на ней или получения детального изображения участков местности. Технически эта задача решается с помощью оптических устройств, размещаемых либо непосредственно жестко на корпусе БПЛА, либо с помощью гиростабилизованных платформ, обеспечивающих поворот оптических осей устройств в любую сторону с заданной скоростью. В случае жесткой установки видеокамеры на борту БПЛА существует принципиальная возмож-

ность использования видеонформации для коррекции алгоритма БСО. Существует несколько вариантов получения угловой ориентации БПЛА с помощью канала видеонаблюдения. В первом случае оптическая ось обычной перспективной видеокамеры располагается параллельно продольной оси БПЛА или составляет с ней некоторый угол (рис. 4, а). Для определения углового отклонения БПЛА служит линия горизонта, которая является источником информации об углах тангажа и крена (рис. 4, б) [2]. Этот вариант коррекции характеризуется минимальными изменениями в конструкции и алгоритмах обработки информации. Недостатками алгоритма является то, что горизонт наблюдаем только в определенных интервалах углов рыскания и тангажа, и если БПЛА выходит из этого интервала, то результирующее изображение строится исключительно из изображений неба или Земли. Наконец, перспективная камера позволяет проводить вычисления крена, тангаж можно вычислить только приблизительно, отталкиваясь от предположения о высоте полета БПЛА.

Другим способом определения параметров ориентации за счет средств видеонаблюдения является использование катадиоптрического датчика [3]. Катадиоптрический датчик представляет собой объединение выпуклого зеркала с проецирующей камерой, чья оптическая ось совмещается с оптической осью зеркала (рис. 4, в). Основное преимущество этих датчиков заключается в получении панорамного изображения в одном кадре (рис. 4, г). Панорамный обзор имеет следующие преимущества: во-первых, возможность полного охвата окружающей среды и полный обзор горизонта. Потенциальные затемнения оказывают незначительное воздействие на определение финального результата. Во-вторых, какое бы положение ни занимал БПЛА, горизонт будет всегда присутствовать на изображении даже частично, и, таким образом, углы всегда могут быть рассчитанными. В-третьих, система позволяет рассчитывать крен, а также в одинаковой степени и тангаж без каких-либо дополнительных предлагаемых данных, в отличие от систем, базирующихся на перспективной камере. Тем не менее, пано-

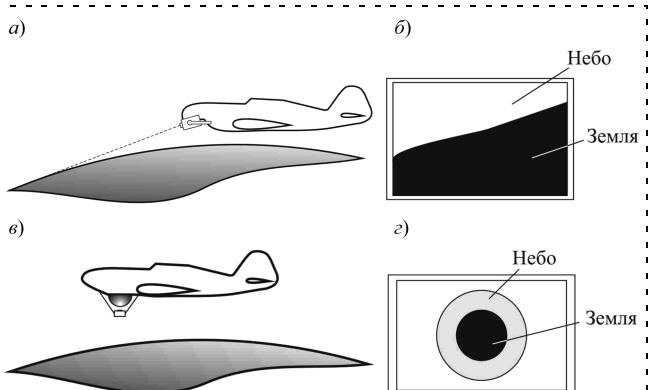


Рис. 4. Получение угловой информации БПЛА по линии горизонта

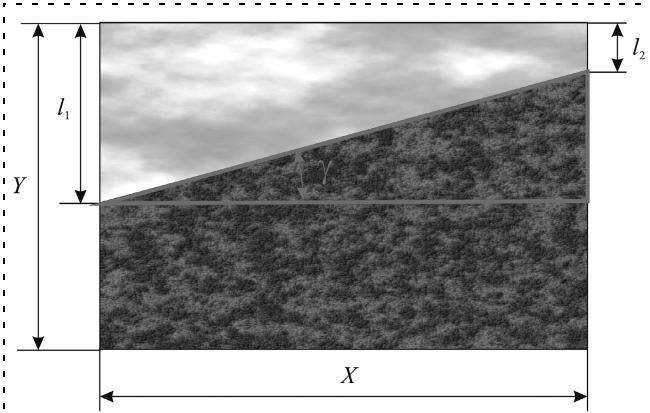


Рис. 5. Изображение линии горизонта в поле зрения видеокамеры

рамный обзор имеет некоторые недостатки. Панорамное изображение содержит значительные деформации, вызванные геометрией зеркала и определенной погрешностью камеры [3]. Эти деформации вносят важные последствия при обработке изображений, и применение прямых классических операций не может дать удовлетворительных результатов. Схема с катадиоптрическим датчиком требует значительной доработки канала видеонаблюдения, связанной с установкой полусферического зеркала, и характеризуется более сложными алгоритмами обработки информации.

В связи с этим в качестве средств коррекции в работе используется панорамная камера.

Матрица видеокамеры имеет размеры $X \times Y$ пикселей. Линия горизонта проецируется в поле зрения видеокамеры в зависимости от углов тангажа и крена самолета. Изображение линии горизонта при повороте ЛА на угол крена приведено на рис. 5.

Если аппроксимировать линию горизонта в виде прямой, то угол крена γ может быть определен из прямоугольного треугольника:

$$\gamma = \arctg \frac{l_1 - l_2}{X}, \quad (4)$$

где l_1, l_2, X — геометрические параметры, приведенные на рис. 5. Так как в процессе съемки один кадр видеосигнала представляет собой совокупность пикселей, то l_1, l_2, X выражаются в пикселях. Точность определения угла крена по формуле (4) будет определяться погрешностями аппроксимации линии горизонта.

Информацию об угле тангажа дают вертикальные смещения линии горизонта в поле зрения видеокамеры (рис. 6, см. третью сторону обложки).

На основе рис. 6 нетрудно записать следующее соотношение

$$\frac{Y/2}{f} = \operatorname{tg} w, \quad (5)$$

где f — фокусное расстояние объектива видеокамеры, w — поле зрения видеокамеры, соответствующее стороне Y матрицы.

Аналогичное равенство можно записать для смещения линии горизонта b , вызванное изменением угла тангажа ϑ :

$$\frac{b/2}{f} = \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2}. \quad (6)$$

Комбинируя соотношения (5) и (6), получаем следующую формулу для вычисления угла тангажа:

$$\vartheta = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b}{Y} \operatorname{tg} w \right). \quad (7)$$

Следует отметить, что тангаж необходимо корректировать значением некоторого угла μ , зависящего от высоты h БПЛА, так как горизонт движется в поле зрения видеокамеры с изменением высоты. Соответствующий угол μ равен 0 на нулевой высоте. Аппроксимируя поверхность Земли под текущим местоположением БПЛА сферой радиуса R [2], возьмем

$$\mu = \arccos \frac{R}{R+h} \quad (8)$$

и формулу (7) перепишем в виде

$$\vartheta = 2 \operatorname{arcrg} \left(\frac{b}{Y} \operatorname{tg} w \right) - \mu. \quad (9)$$

Для подтверждения полученных аналитических зависимостей проводили эксперимент, в котором использовали в качестве средств видеонаблюдения цифровой фотоаппарат с режимом видеосъемки и инерциальный измерительный модуль (ИИМ) на микромеханических гироскопах ADXRS-150 фирмы Analog Devices. ИИМ и фотоаппарат устанавливали на поворотный стенд, приводимый в колебательное движение, что приводило к изменению углов крена и тангажа. На неподвижном основании устанавливали модель местности в виде голубого неба и зеленой Земли. После запуска ИИМ и фотоаппарата одновременно осуществляли запись показаний ММГ и видеофайла. Затем показания микромеханических гироскопов и видеофайл загружали в программу MATLAB, где реализовывали алгоритм БСО (3) и осуществляли обработку видеоданных. Для получения углов тангажа и крена за счет видеонаблюдения необходимо выделить линию горизонта. Для этого исходный видеофайл разрешением 640×480 в формате RGB преобразовывали предварительно в оттенки серого, а затем в черно-белое изображение. При определении угла крена из каждого черно-белого кадра видеофайла извлекали первый и последний столбец и определяли номер пикселя перехода с белого цвета (небо) к черному (Земля), что соответствует параметрам l_1 и l_2 в формуле (4). После этого определяли угол крена за счет видеонаблюдения. Аналогично реализовывали алгоритм для определения угла тангажа, только анализировали центральный столбец каждого кадра видео-

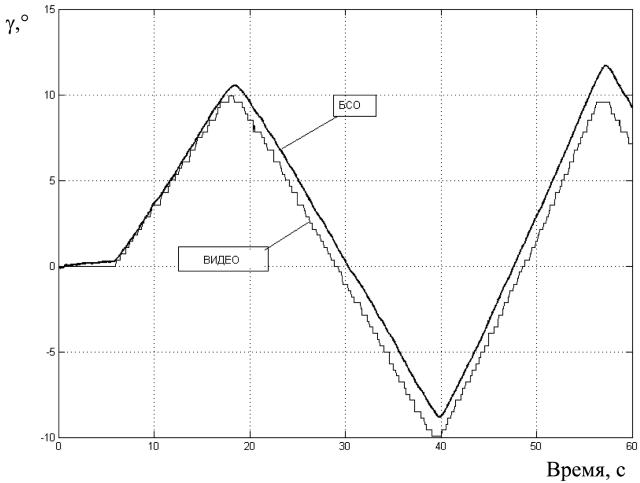


Рис. 7. Определение угла крена с помощью БСО и видеонаблюдения

файла. Результаты определения угла крена с помощью БСО и видеонаблюдения приведены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что крен, выработанный БСО, имеет тенденцию к накоплению погрешностей, в отличие от крена, полученного за счет видеонаблюдения. Таким образом, объединение БСО и канала видеонаблюдения позволит создать надежную и достаточно точную систему ориентации БПЛА.

Список литературы

- Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Под общ. ред. В. Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 280 с.
- Винклер С., Шульц Х.-В., Бушманн М., Кордес Т., Ферсманн П. Дешевая интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система для малого летательного аппарата, дополненная каналом видеонаблюдения // Гирроскопия и навигация. 2004. № 4. С. 36–48.
- Cédric Demonceaux, Pascal Vasseur UAV Attitude Computation by Central Catadioptric Vision. C.R.E.A. EA 3299.

УДК 629.191

В. И. Миронов, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр.,
Ю. В. Миронов, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Р. М. Юсупов, чл.-корр. РАН,
 д-р техн. наук, проф., директор,
 Санкт-Петербургский институт
 информатики и автоматизации РАН
 mironov@yandex.ru

Вариационное оценивание параметров движения космических аппаратов по критерию максимального правдоподобия

Рассматривается применение вариационного подхода для решения задач навигационного оценивания параметров движения космических аппаратов по критерию максимального правдоподобия на основе совместной обработки измерительных данных бортовой навигационной аппаратуры потребителя, работающей по сигналам спутниковой радионавигационной системы. Приводится численный пример.

Ключевые слова: статистическое оценивание, нелинейные динамические системы, критерий максимального правдоподобия, навигация космических аппаратов

Введение

В настоящее время основными методами определения орбит космических аппаратов (КА) являются методы, основанные на совместной обработке результатов наблюдений по полной выборке. Они широко освещены в отечественной и зарубежной

литературе [1–4, 8–10 и др.] и позволяют успешно решать широкий круг важных и сложных прикладных задач. Созданная методология в основном базируется на непосредственном применении в динамических задачах оценивания условий метода максимального правдоподобия (ММП) и метода наименьших квадратов. По смыслу они представляют собой необходимые условия оптимальности, характерные для прямых методов оптимизации.

Вместе с тем, метод максимального правдоподобия может быть реализован на основе использования условий оптимальности оценок вариационного типа. Вопросы обоснования и разработки соответствующей вариационной технологии рассматривались в работе авторов [6] применительно к оцениванию состояния нелинейных динамических систем.

Данная статья посвящена вопросам вариационного подхода к решению задач навигационного оценивания параметров движения КА по измерительным данным установленной на его борту навигационной аппаратуры потребителя (НАП), работающей по сигналам спутниковой радионавигационной системы. При этом в качестве измерений рассматриваются оценки векторов параметров текущего состояния КА, получаемые НАП на заданном мерном интервале времени, которые подлежат совместной обработке. В статье определяются и конкретизируются необходимые условия оптимальности оценок вариационного типа применительно к модели движения КА в нормальном гравитационном поле, учитывающем полярное сжатие Земли. Приводятся результаты численных расчетов.

Постановка задачи и вариационные условия оптимальности оценок

Рассмотрим задачу оценивания параметров движения динамического объекта, которая заключается в наилучшем в некотором смысле определении n -мерного вектора его исходного состояния \mathbf{x}_0 на заданный начальный момент времени $t = t_0$ по результатам измерений, проводимых в N точках t_i , данных на интервале измерений $\tau = T - t_0$.

Задача. Пусть динамика объекта описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \Phi(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, t \in [t_0, T].$$

Измерениям подвергается m -мерный вектор

$$\psi(t) = \psi[\mathbf{x}(t)].$$

Измеренное значение вектора ψ в момент t_i обозначим $y(t_i) = y_i$ и представим модель измерений в виде

$$y(t_i) = \psi[\mathbf{x}(t_i)] + \delta_i,$$

$$i = 1(1)N; t_i \in [t_0, T].$$

Здесь δ_i — m -мерный вектор случайных ошибок измерений, стохастическое изменение которого зададим некоторым многомерным непрерывным дифференцируемым распределением $f(\delta_i, \alpha_i)$ с параметрами α_i , отличающимся в общем случае от нормального распределения.

Требуется найти такую оценку вектора \mathbf{x}_0 , которая обеспечивает минимальное значение функционала

$$I = \sum_{i=1}^N \rho_i \{y(t_i) - \psi[\mathbf{x}(t_i)], \alpha_i\},$$

где $\rho_i = \ln f_i \{y(t_i) - \psi[\mathbf{x}(t_i)], \alpha_i\}; i = 1(1)N$.

Функции $\Phi(\mathbf{x}, t)$ и $\psi[\mathbf{x}(t)]$ будем считать однозначными, ограниченными, непрерывными и дифференцируемыми по всем своим аргументам во всей области их определения.

Нетрудно видеть, что функционал I есть не что иное, как логарифмическая функция правдоподобия.

Предполагается выполнение известных условий наблюдаемости.

Для решения поставленной задачи в работе авторов [6] были получены условия оптимальности оценок вариационного типа, которые заключаются в следующем: оптимальная оценка вектора \mathbf{x}_0 и соответствующая ей оптимальная траектория доставляют решение краевой задаче для следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \Phi(\mathbf{x}, t); \dot{\lambda} = -\frac{\partial \Phi^T}{\partial \mathbf{x}} \lambda,$$

при граничных условиях

$$\lambda(t_i^+) = \lambda(t_i^-) + \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} [y_i, \psi(\mathbf{x}_i), t_i];$$

$$\lambda(t_0) = 0; \lambda(T) = 0;$$

$$i = 1(1)N.$$

Таким образом, рассматриваемую задачу можно интерпретировать как двухточечную краевую задачу с промежуточными ограничениями на сопряженный вектор $\lambda(t)$.

Приведенные выше условия оптимального оценивания нетрудно конкретизировать применительно к заданному виду распределения вектора случайных ошибок измерений.

Так, если для вектора δ_i принимается нормальное распределение $N(0, K_{\delta_i})$ с нулевым вектором математического ожидания и корреляционной матрицей K_{δ_i} , что, как правило, имеет место на практике, решение задачи оптимального оценивания сводится к решению краевой задачи

$$\dot{\mathbf{x}} = \Phi(\mathbf{x}, t); \dot{\lambda} = -\frac{\partial \Phi^T}{\partial \mathbf{x}} \lambda;$$

$$\lambda(t_0) = 0; \lambda(T) = 0;$$

$$\lambda(t_i^+) = \lambda(t_i^-) + \frac{\partial \psi^T(t_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \{y_i - \psi[\mathbf{x}(t_i)]\};$$

$$i = 1(1)N.$$

Согласно этим условиям для получения оптимальной оценки вектора \mathbf{x}_0 необходимо решить краевое уравнение

$$\lambda(\mathbf{x}_0, T) = 0,$$

заданное неявно на процедурах интегрирования сопряженных систем дифференциальных уравнений. Для этого можно применить известные численные методы поиска корней нелинейных уравнений, например, метод Ньютона, его модификации и другие.

Определение параметров орбиты космического аппарата по результатам измерений

Рассмотрим особенности применения вариационного метода максимального правдоподобия на примере решения задачи статистического оценивания параметров движения КА по измерительным данным НАП, работающей по сигналам спутниковой радионавигационной системы [7]. В качестве измерений рассматриваются оценки векторов параметров текущего состояния КА, получаемые НАП на заданном мерном интервале времени, которые подлежат совместной обработке. Движение КА будем рассматривать в нецентральном гравитационном поле с учетом квадрата полярного сжатия Земли. Соответствующие уравнения движения в

абсолютной геоцентрической системе координат представлены в следующем удобном для программирования виде [5]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v_x; \quad \dot{y} = v_y; \quad \dot{z} = v_z; \\ \dot{v}_x &= \left(-\frac{\mu}{r^3} + p \right) x; \quad \dot{v}_y = \left(-\frac{\mu}{r^3} + p \right) y; \\ \dot{v}_z &= \left(-\frac{\mu}{r^3} + p + \Delta p \right) z; \\ p &= \frac{3}{2} \frac{\mu}{r^3} J_{20} \left(1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 + \\ &+ \frac{15}{8} \frac{\mu}{r^3} J_{40} \left(-1 + 14 \frac{z^2}{r^2} - 21 \frac{z^4}{r^4} \right) \left(\frac{R_e}{r} \right)^4; \\ \Delta p &= 3 \frac{\mu}{r^3} J_{20} \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 + \frac{15}{8} \frac{\mu}{r^3} J_{40} \left(\frac{28}{3} \frac{z^2}{r^2} - 4 \right) \left(\frac{R_e}{r} \right)^4; \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ J_{20} &= -1082627 \cdot 10^{-9}; \quad J_{40} = 2371 \cdot 10^{-9},\end{aligned}$$

где $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ и $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$ — векторы координат и скорости движения КА, соответственно; $R_e = 6378,136$ км — экваториальный радиус Земли; $\mu = 398600,44$ км³/с² — постоянная притяжения Земли.

Проводятся прямые полные дискретные измерения элементов векторов \mathbf{r} и \mathbf{v} , так что модель измерений принимает вид

$$\mathbf{y}_{1_i} = \mathbf{r}(t_i) + \delta \mathbf{r}_i; \quad \mathbf{y}_{2_i} = \mathbf{v}(t_i) + \delta \mathbf{v}_i; \quad i = 1(1)N,$$

где $\delta \mathbf{r}_i$, $\delta \mathbf{v}_i$ — ошибки оценок НАП, полученных в моменты времени t_i .

Составим далее соответствующую сопряженную систему дифференциальных уравнений. Анализ показывает, что при обработке навигационных данных на ограниченных мерных интервалах в модели сопряженной системы можно ограничиться членами, соответствующими ньютоновской части гравитационного поля. В этом случае будем иметь следующую систему сопряженных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\lambda}_r &= \frac{\pi_0}{r^3} \left[\lambda_v - \frac{3}{r^2} (\mathbf{r} \mathbf{r}^T) \lambda_v \right]; \quad \dot{\lambda}_v = -\lambda_r; \\ \lambda &= [\lambda_r, \lambda_v]^T = [\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \lambda_{v_x}, \lambda_{v_y}, \lambda_{v_z}]^T.\end{aligned}$$

Теперь в соответствии с приведенными выше вариационными условиями оптимальности для оценивания вектора начального состояния КА $\mathbf{q} = [\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0]^T$ необходимо решить двухточечную краевую задачу для приведенных систем уравне-

ний движения и сопряженных уравнений с учетом следующих граничных условий:

$$\begin{aligned}\lambda(t_0) &= 0; \quad \lambda(T) = 0; \\ \lambda_r(t_i^+) &= \lambda_r(t_i^-) + \mathbf{K}_{r,i}^{-1} [\mathbf{y}_{1,i} - \mathbf{r}(t_i)]; \\ \lambda_v(t_i^+) &= \lambda_v(t_i^-) + \mathbf{K}_{v,i}^{-1} [\mathbf{y}_{2,i} - \mathbf{v}(t_i)]; \\ i &= 1(1)N,\end{aligned}$$

где $\mathbf{K}_{r,i}$ и $\mathbf{K}_{v,i}$ — корреляционные матрицы ошибок измерений векторов координат и скорости движения КА соответственно. Предполагается, что векторы ошибок $\delta \mathbf{r}_i$ и $\delta \mathbf{v}_i$ взаимно некоррелированы.

Таким образом, решение задачи сводится к поиску корней краевого уравнения

$$\lambda(\mathbf{q}, T) = 0,$$

где через \mathbf{q} обозначено неизвестное начальное значение вектора состояния КА \mathbf{x}_0 .

Применение метода Ньютона приводит к следующему итерационному алгоритму:

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k - \left[\frac{\partial \lambda(\mathbf{q}, T)}{\partial \mathbf{q}} \right]_k^{-1} \lambda(\mathbf{q}_k, T); \quad k = 0, 1, 2, \dots .$$

Приведем некоторые результаты вычислений.

Расчеты проводили для спутника, находящегося на орбите с высотой $h = 1000$ км и эксцентриситетом $e = 0,003$. С помощью датчика случайных величин по нормальному закону распределения на мерном интервале $T = 100$ с моделировали с шагом $\Delta t = 1$ с статистической выборкой прямых измерений вектора текущего состояния КА. При этом предельные ошибки измерений задавали равными 100 м по элементам вектора координат и 1 м/с — по элементам вектора скорости.

Некоторые результаты расчетов приведены в табл. 1, 2.

В табл. 1 даны точные значения параметров начального фазового состояния КА в абсолютной геоцентрической системе координат, принятное начальное приближение элементов уточняемого вектора, полученные в результате вариационной обработки измерений оптимальные оценки, а также характеристики точности оценивания. В табл. 2 представлены значения ошибок оценивания по итерациям. Приведенные данные таблиц свидетельствуют о достаточно высокой точности и скорости сходимости вычислительного процесса.

Таблица 1

Результаты оптимального оценивания

Оцениваемые параметры	x_0 , км	y_0 , км	z_0 , км	v_{x_0} , км/с	v_{y_0} , км/с	v_{z_0} , км/с
Точные значения	5201,004	633,84	5162,23	-5,1998	0,63639	5,18301
Начальное приближение	5251,004	683,84	5212,23	-5,1498	0,68639	5,23301
Оптимальные оценки	5200,995	633,84	5162,23	-5,1998	0,3640	5,18299
Ошибки оценивания	-0,009	-0,003	0,002	-0,00001	0,00001	0,00002

Таблица 2

Сходимость вычислительного процесса

Номер итерации	Ошибки оценивания					
	δx_0 , м	δy_0 , м	δz_0 , м	δv_{x_0} , м/с	δv_{y_0} , м/с	δv_{z_0} , м/с
0	50000	50000	50000	50	50	50
1	-8	-4	4	-0,08	0,07	-0,10
2	-9	-3	2	-0,01	0,01	-0,02
3	-9	-3	2	-0,01	0,01	-0,02

В заключение отметим, что рассматриваемые в статье методические средства могут быть использованы при разработке и модернизации бортовых алгоритмов навигационного оценивания КА, оснащенных навигационной аппаратурой, работающей по сигналам навигационных спутников. Алгоритмы вариационного типа могут применяться самостоятельно или параллельно с традиционными алгоритмами прямого оптимального оценивания для контроля правильности вычислений и обеспечения надежности расчетов. Они могут также найти применение при решении задач тестирования приближенных алгоритмов навигационного оценивания и обоснования эффективного состава и программы измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-08-00259).

Список литературы

1. Аким Э. Л., Энеев Т. М. Определение параметров движения космических аппаратов по данным траекторных измерений // Космические исследования. 1963. Т. 1. № 1. С. 5–50.
2. Брандин Н. К., Разоренов Г. Н. Определение траекторий КА. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
3. Космические траекторные измерения / Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. М.: Сов. радио, 1969. 504 с.
4. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 350 с.
5. Мамон П. А., Половников В. И., Слезкинский С. К. Баллистическое обеспечение космических полетов. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1990. 622 с.
6. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 2–6.
7. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.
8. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
9. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. МО СССР, 1984. 563 с.
10. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 416 с.

НОВЫЕ КНИГИ



Вышло в свет второе издание книги О. А. Степанова

**"Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации".
Часть 1. "Введение в теорию оценивания"**

Автор книги — Олег Андреевич Степанов, доктор технических наук, начальник отдела ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", заместитель заведующего базовой кафедрой "Информационно-навигационных систем" Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, член Президиума Международной общественной организации "Академия навигации и управления движением", автор четырех монографий и более 150 статей.

В книге излагаются общие принципы и подходы, используемые при построении алгоритмов оценивания как в линейных, так и в нелинейных задачах. Значительное внимание уделяется обоснованию возможности синтеза наиболее распространенных стохастических алгоритмов оценивания на основе детерминированного подхода, не требующего привлечения понятий теории вероятностей. Анализируется взаимосвязь алгоритмов, получаемых в рамках рассматриваемых подходов при различном объеме априорной информации. Методы и алгоритмы, полученные для постоянного вектора, обобщаются применительно к оцениванию случайных последовательностей, наиболее важным здесь является фильтр Калмана и его различные модификации.

Предлагаемый материал поясняется на примерах и задачах методического характера, а также на примерах, связанных с обработкой навигационной информации. В частности, рассматриваются задачи оценивания коэффициентов полинома, определения сдвига между реализациями, определения координат по точечным ориентирам, комплексной обработки избыточных измерений. При этом значительное внимание уделяется алгоритмам, используемым при коррекции навигационных систем с привлечением внешних данных. К примеру, здесь обсуждаются особенности реализации слабосвязанных и сильносвязанных схем комплексирования, получивших наибольшее распространение при построении интегрированных инерциально-спутниковых систем.

Книга подготовлена с учетом многолетнего опыта, накопленного автором при проектировании алгоритмов обработки для навигационных систем различного типа, а также опыта преподавания и чтения лекций для аудиторий с разным уровнем подготовки, включая студентов, аспирантов и зарубежных специалистов. Материал четко структурирован, что существенно облегчает его изучение и возможность использования для формирования курсов лекций по отдельным разделам для слушателей с различным уровнем подготовки.

Книга издана как учебное пособие, имеет рекомендацию Учебно-методического объединения вузов по университетскому политическому образованию по направлению "Системы управления движением и навигация" при МГТУ им. Н. Э. Баумана. Адресована студентам старших курсов и аспирантам, специализирующимся в рассматриваемой области, а также инженерам и научным работникам, чьи интересы связаны с проблемами построения эффективных алгоритмов оценивания не только применительно к задачам обработки навигационной информации, но и в смежных областях, в частности, связанных с задачами траекторного слежения.

По вопросу приобретения книги можно обращаться по тел. 812-499-82-93,
см. также <http://www.elektropribor.spb.ru> (публикации).

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2010 г.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Гулуве Г. А., Саттарова У. Э.** Помехотехнологии индикации и идентификации скрытого периода перехода объекта из нормального в аварийное состояние. № 9.
- Анисимов Д. Н., Мякинков Д. А.** Методика проведения эксперимента при идентификации нелинейных динамических объектов. № 11.
- Арановский С. В., Бардов В. М.** Алгоритм идентификации параметров системы "двигатель—двухмассовый механизм". № 5.
- Бобцов А. А., Быстров С. В., Григорьев В. В., Мотылькова М. М., Рабыш Е. Ю., Рюхин В. Ю., Мансурова О. К.** Синтез статических регуляторов в дискретных системах с периодически изменяющимися коэффициентами методами модального управления. № 5.
- Бобцов А. А., Николаев Н. А., Слита О. В.** Новая схема идентификации частоты синусоидального сигнала. № 11.
- Бронников А. М., Буков В. Н.** Децентрализованное адаптивное управление с идентификацией и модельной координацией в многосвязных системах. № 1.
- Буков В. Н., Сельвесюк Н. И.** Робастное подавление внешних возмущений в многосвязной системе с децентрализованным координированным управлением. № 2.
- Виттих В. А.** Проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах. № 12.
- Горнов А. Ю.** Численные методы исследования задач оптимального управления в механических системах. № 8.
- Девятисильный А. С., Кислов Д. Е.** Спектральные портреты и устойчивость линейных систем. № 4.
- Державин О. М., Сидорова Е. Ю.** Исследование неавтономной сингулярно возмущенной динамической модели нелинейной системы на основе уравнений первого приближения. № 10.
- Еремин Е. Л., Кван Н. В., Семичевская Н. П.** Робастное управление нелинейными объектами с наблюдателем полного порядка и быстродействующей эталонной моделью. № 5.
- Зверьков В. П., Кузицин В. Ф., Тощев М. С.** Автоматизированная настройка каскадной системы регулирования с одновременной настройкой контуров. № 10.
- Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А., Назаров А. Ш.** Об одном подходе к построению адаптивных многосвязных систем автоматического управления сложным динамическим объектом. № 8.

- Ким Д. П.** Синтез неминимально-фазовых систем управления с заданным временем регулирования. № 4.
- Коломейцева М. Б., Агвами С. А.** Синтез алгоритма прямого адаптивного управления многосвязным объектом методом декомпозиции с явной эталонной моделью. № 8.
- Колосов О. С., Лепешкин С. Н., Сухецкий А. П., Зимин В. А.** Специфика параллельной работы динамических объектов и систем на общую нагрузку. № 10.
- Колюбин С. А., Пыркин А. А.** Адаптивное управление маятником с инерционным маховиком. № 5.
- Краснощеченко В. И.** Теоретико-групповой подход к синтезу регуляторов нелинейных аффинных систем на примере управления перевернутым маятником. № 7.
- Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.** Адекватность прямого и вариационного подходов в задачах оценивания состояния нелинейных динамических систем при гауссовских ошибках измерений. № 11.
- Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.** Учет априорной информации при вариационном оценивании состояния нелинейных динамических систем и гауссовских ошибках измерений. № 10.
- Моржин О. В., Тятоушкин А. И.** Аппроксимация множеств достижимости и разрешимости нелинейных управляемых дифференциальных систем. № 2.
- Павлюк Г. П., Шихин В. А.** Построение областей заданного качества управления на основе статистического подхода: метод отсекающих моделей. № 10.
- Ржевский Г. А.** Теория сложных систем и мультиагентные технологии: методология для практического использования. № 12.
- Романов А. М.** Оценка старших производных в контуре цифровой системы управления в условиях шумов. № 3.
- Седов А. В., Тришечкин Е. В.** Новый подход для оценки учета высокочастотных составляющих при выборе частоты дискретизации сигнала. № 3.
- Сельвесюк Н. И.** Синтез управления для множества объектов на основе прямых и обратных задач оптимизации. № 10.
- Скобелев П. О.** Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем. № 12.
- Стебулянин М. М.** Алгоритм асимптотической стабилизации в целом интервальных квадратичных систем с неограниченным управлением. № 5.

Степанов О. А. Рекуррентное оценивание и фильтрация: предыстория и современное состояние. № 12.

Ушаков А. В., Центарный А. Ю. Формирование полиномиальной динамической модели в задаче модального управления при сложном экзогенном стохастическом воздействии. № 3.

Филаретов В. Ф., Губанков А. С. Синтез адаптивных систем управления, настраивающихся по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами. № 1.

Филимонов Н. Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы. № 12.

Фурсов В. А. Согласованная идентификация управляемого объекта по малому числу наблюдений. № 3.

Фуртат И. Б. Непрерывно-дискретное робастное управление линейным объектом. № 4.

Цыкунов А. М. Робастное управление одним классом неминимально-фазовых объектов с компенсацией ограниченных возмущений. № 9.

Цыкунов А. М. Следящие системы для линейных объектов с запаздывающим управлением. № 3.

Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Специальная рециональная база данных для оптимизации и автоматизации синтеза комбинационных автоматов. № 9.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Волкоморов С. В., Карпенко А. П. Планирование оптимальной целевой конфигурации роботоманипулятора типа "хобот". № 8.

Герасун В. М., Несмиянов И. А. Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов. № 2.

Зенкевич С. Л., Космачев П. В. Управление движением мобильного робота в неподвижную точку. № 3.

Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Оценка параметра по информации от нескольких датчиков. № 9.

Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Самоорганизующиеся системы группового управления интеллектуальными роботами. № 12.

Клевалин В. А., Поливанов А. Ю. Системы технического зрения в промышленной робототехнике. № 9.

Паршева Е. А. Децентрализованное робастное управление многозвенным манипулятором сварочного производства. № 2.

Филаретов В. Ф., Legnani G., Ruggeri S. Система автоматического управления манипулятором типа SCARA для выполнения силовых рабочих операций на боковых поверхностях заготовок произвольной формы. № 8.

Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш. Особенности использования программной сре-

ды "MatLab" для визуального моделирования движений многозвенных манипуляторов. № 9.

Яшунский В. А. Разработка и исследование алгоритмов обработки изображения для систем технического зрения на основе фокусировки. № 9.

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Ермолов И. Л., Никитин В. Н., Собольников С. А. Интерактивный тренажер для операторов мобильных роботов с элементами актуальной адаптации. № 9.

Себряков Г. Г. Аппроксимирующие модели деятельности человека-оператора в полуавтоматических системах управления динамическими объектами. № 1.

Себряков Г. Г. Моделирование деятельности человека-оператора в полуавтоматических системах управления динамическими объектами. № 4.

Фархатдинов И. Г., Подураев Ю. В., Ю Дж.-Х. Экспериментальное исследование позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления в системах дистанционного управления мобильными роботами. № 1.

СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Анисимов Д. Н., Астахова Ю. Ю., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Зуева М. В., Цапенко И. В. Дифференциация патологий сетчатки глаза на основе нечеткой логики. № 2.

Дунин-Барковский И. И. Обработка информации, изображений и управление в мехатронной системе универсальным контроллером на основе FPGA. № 11.

Зенкевич С. Л., Минин А. А., Све Лин Хтун Аунг. Еще одно решение задачи построения 3D-карты. № 6.

Перепелкин Е. А., Черных М. С. Пропорционально-интегральный регулятор системы управления перегрузкой узла компьютерной сети. № 5.

Тимофеев А. В., Дерин О. А., Гулленко И. Е., Андреев В. А. Распознавание объектов в сложных мультиизображениях и методы и средства видеозахвата движений. № 6.

Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Логическое управление и обработка информации в мехатронных системах. № 5.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Андреев М. В., Иващенко А. В., Мартышкин Д. М., Скobelев П. О., Уланова Л. В., Царев А. В. Применение мультиагентных технологий динамического планирования персональных задач при организации коллективного взаимодействия. № 10.

- вия в автоматизированных системах управления распределением ресурсов. № 7.
- Андреевская Н. В., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.** Нейронечеткое управление параллельной работой синхронных генераторов с демпферной обмоткой в сети конечной мощности. № 11.
- Антонов А. Н., Аршанский М. М.** Нечеткая модель системы принятия решений по выбору параметров дозирования пипетирующей станции EVO Freedom 75. № 3.
- Горячев О. В., Шарапов М. А., Иванова Е. С.** Синтез нечеткого регулятора для управления приводом наведения и стабилизации с многомассовой механической подсистемой. № 11.
- Иванов Е. Б.** Система поддержки принятия решений по управлению доменным процессом. № 3.
- Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю.** Устойчивость нечетких автоматных и реляционных динамических систем. № 6.
- Кудинов Ю. И., Байков С. В., Кудинов И. Ю.** Методы и модели нечеткого предиктивного управления. № 2.
- Нечаев Ю. И.** Информационные технологии и управление в бортовых интеллектуальных системах новых поколений. № 1.
- Осипов В. Ю.** Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных системах. № 7.
- Резчиков А. Ф., Митяшин Н. П., Кузьмиченко Б. М., Рябов О. Н., Карпук Р. В.** Многокритериальный выбор оборудования на основе нечеткой меры ценности критериев. № 1.
- Терехов В. А., Никонов А. Н.** Синтез нейрорегулятора нелинейных динамических объектов на основе одной модели бифуркации. № 1.
- Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть. 1. Основы агентного подхода. № 7.
- Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть. II. Агентные решения в задачах контроля и управления. № 10.
- Филимонов А. Б., Покровский Я. О.** Электронная паспортизация в системах интеллектуального управления техническим состоянием промышленного оборудования. № 7.
- ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ**
- Башилов А. С., Геращенко А. Н., Гусинский И. И., Куликов Н. И., Куприянов А. Д., Рябин Д. А., Фадеев В. В.** Системное проектирование вентильных двигателей с микропроцессорным управлением для прецизионных систем электропривода. № 4.
- Белгородский В. С., Гусаров А. В., Козлов А. С., Кадушкин С. В.** Современный подход к моделированию множества сборок механизмов малых перемещений. № 4.
- Буканова Т. С., Савиных А. Б.** Оценка энергоэффективности управления электроприводом с дифференциальным торможением. № 11.
- Гагарин С. А., Кривилев А. В., Ситникова А. В.** Дополнительные потери мощности в мехатронном модуле привода на основе трехфазного вентильного двигателя с фазами, соединенными по схеме "треугольник". № 11.
- Ганин Л. В.** Анализ процессов управления линейными синхронными двигателями на основе быстродействующих синусоидальных усилителей мощности. № 3.
- Евстафиева С. В., Молодцов В. В.** Моделирование следящего привода подачи современных станков с ЧПУ. № 9.
- Когут А. Т.** Синтез приближенных алгоритмов двойного управления двигателями постоянного тока на основе процедур линеаризации. № 3.
- Кожевникова М. В.** Системные методы непрерывного усовершенствования продукции на уровне изобретений на примере планетарных передач винт — гайка с резьбовыми роликами. № 4.
- Кривилев А. В.** Математическое описание цифровой системы управления мехатронного модуля привода с трехфазным вентильным двигателем. № 7.
- Морозов В. В., Шмелев В. Е., Сбитнев С. А.** Применение пространственно-фазового метода моделирования электромеханического преобразования энергии к классу вентильных электрических машин обращенной конструкции. № 11.
- Панкратов В. В., Котин Д. А.** Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном синхронном электроприводе. № 4.
- Фалдин Н. В., Липатов А. Ю., Моржов А. В.** Синтез оптимального по быстродействию объемного силового гидропривода при задании ограничения на потребляемую мощность. № 3.
- КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**
- Александрова Т. В., Громаков Е. И.** Робастная процедура диагностики мехатронных устройств кабельного производства с использованием контрольных карт. № 5.
- Анисимов Д. Н., Колосов О. С., Вершинин Д. В., Зуева М. В., Цапенко И. В.** Диагностика динамических объектов методами нечеткой логики с использованием параметров имитационных моделей. № 10.

- Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В.** Уменьшение длительности получения информации о смещениях торцов лопаток. № 5.
- Береснев А. Л., Береснев М. А.** Виброакустический метод диагностики двигателя внутреннего сгорания. № 6.
- Бусурин В. И., Князь В. А., Ходин М. М., Скрипник Н. П.** Сканирующий профилометр для измерения профиля цилиндрических тел. № 2.
- Волков В. С., Баринов И. Н.** Диагностическое обеспечение интеллектуальных полупроводниковых датчиков давления. № 6.
- Габидулин М. А.** Экстремальный метод повышения точности фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений. № 6.
- Габидулин М. А.** Спектральный метод повышения точности фотоэлектрических цифровых преобразователей перемещений. № 11.
- Дударенко Н. А., Полякова М. В., Ушаков А. В.** Алгебраическая постановка задачи контроля системного вырождения сложных технических систем. № 5.
- Дунин-Барковский И. И., Подураев Ю. В.** Современные оптомехатронные системы для трехмерного оптического контроля объектов. № 9.
- Жирабок А. Н., Якшин А. С.** Решение задачи аккомодации к дефектам технических систем, заданных структурными схемами. № 5.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Аршанский М. М., Тимошков В. Н.** Разработка и исследование четырехзвенных передаточных механизмов стеклоочистителя легкового автомобиля. № 8.
- Беляев Л. В., Морозов В. В., Жданов А. В.** Обоснование конструкций лабораторных стендов для исследования характеристик систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца. № 2.
- Васильев Д. А., Колоколов М. В., Иващенко В. А.** Прогнозирование электропотребления в АСУ энергетикой промышленных предприятий. № 8.
- Грибков А. А.** Повышение точности и производительности автоматизированных систем весового порционного дозирования материалов. № 9.
- Загидуллин Р. Р.** Количественный подход в управлении качеством продукции. № 2.
- Заруднев А. С., Илюхин Ю. В.** Повышение производительности лазерных комплексов на основе прогноза контурной ошибки. № 9.
- Колоденкова А. Е.** Статистический подход к оценке реалистичности программных проектов для автоматизированных информационно-управляющих систем. № 4.
- Лебедев Г. Н.** Постановка задачи оптимального управления технологическими процессами для обеспечения динамической устойчивости промышленного производства в кризисных ситуациях. № 7.
- Логинов А. В., Подураев Ю. В., Харцбекер К., Илленфельдт Ш.** Оптимизация динамических свойств многокоординатных обрабатывающих центров с гибридной кинематической структурой. № 9.
- Пудовиков О. Е.** Автоматическое управление скоростью движения длинносоставного грузового поезда. № 8.
- Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.** Управление параллельной работой синхронных генераторов с квазистатическими внешними характеристиками в полярной системе координат. № 7.
- Щербаков В. С., Корытов М. С., Григорьев М. Г.** Синтез алгоритма автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины. № 7.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАНОЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

- Бобырь М. В., Титов В. С., Беломестная А. Л.** Стабилизация теплового режима в процессе резания. № 6.
- Бобырь М. В., Титов В. С.** Метод коррекции параметров режима резания в системах с ЧПУ. № 7.
- Зориктуев В. Ц., Шангареев Р. Р.** Исследование возможностей нечетких моделей процесса точечного в задачах управления режимами резания. № 6.
- Мартинов Г. М., Обухов А. И., Пушкин Р. Л.** Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ. № 6.
- Мартинова Л. И., Мартинов Г. М.** Организация межмодульного взаимодействия в распределенных системах ЧПУ. Модели и алгоритмы реализации. № 11.

МИКРО- И НАНОМЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Афонин С. М.** Решение матричных уравнений в задачах электроупругости для многослойных актиuatorов наноперемещений. № 8.
- Саханский С. П.** Управление скоростью вытягивания при выращивании монокристаллов кремния. № 8.
- Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б.** Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы. № 1.

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Аверьянов А. М., Бобров М. С., Чекушкин В. В.** Параметрическое задание кинематики движения воздушного объекта на участке маневрирования. № 5.
- Бабак Л. Н., Щербатюк А. Ф.** Некоторые методы оценивания состояния водных акваторий с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов. № 5.
- Бобков В. А., Борисов Ю. С.** Навигация подводного аппарата на малых дистанциях по оптической информации. № 2.
- Борисенко Ю. Г., Володина Л. А., Касьянов И. Ю., Кузнецов А. Г.** Основные принципы унифицированного построения трактов автоматического управления полетом самолета на режиме "Уход на 2-й круг". № 7.
- Ванин А. В.** Статистический метод оценки качества поисковых траекторий при слежении за искусственными спутниками Земли. № 5.
- Гайдук А. Р.** Абсолютно инвариантное управление силовой установкой летательного аппарата. № 11.
- Девятисильный А. С., Кислов Д. Е.** Определение движения космического аппарата по внешним наблюдениям. № 8.
- Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В.** Анализ и управление температурными полями волнового твердотельного датчика инерциальной информации. № 4.
- Дорожко В. М.** Идентификация начального этапа экстренного торможения морского судна. № 4.
- Заведеев А. И.** Вероятностные модели захвата звезд астродатчиком в задаче определения ориентации космического аппарата. № 4.
- Кабанов А. А.** Система автоматической посадки летательного аппарата корабельного базирования. Часть 1. Подсистема торможения. № 11.
- Кербер О. Б., Мазур В. Н., Цатуриян К. Т.** Особенности автоматизации посадки самолетов гражданской авиации по категории III ICAO. № 7.
- Корсун О. Н., Лещенко И. А., Немичев М. В.** Исследование возможностей фазохронометрических методов в задаче диагностики газовоздушного тракта авиационных газотурбинных двигателей. № 6.
- Лебедев Г. Н., Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е.** Управление авиационной системой, находящейся под стохастическим влиянием метеофакторов. № 7.
- Левский М. В.** Оптимизация управления переориентацией космического аппарата за заданное время. № 8.

- Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.** Вариационное оценивание параметров движения летательных аппаратов по критерию максимального правдоподобия. № 12.
- Матвеев В. В., Распопов В. Я., Лихошерст В. В.** Система ориентации беспилотного летательного аппарата с каналом видеонаблюдения. № 12.
- Нагар Ю. Н., Ольшанский В. Ю., Панкратов В. М., Серебряков А. В.** Об одной модели пьезогироскопа. № 2.
- Парамонов П. П., Сабо Ю. И., Шукалов А. В., Матвеев В. В., Распопов В. Я.** Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата. № 10.
- Пономаренко А. В., Бодров А. С., Халтобин В. М.** Автоматическое распознавание малоразмерных объектов при дешифрировании данных дистанционного зондирования земной поверхности с использованием комплексных признаков. № 11.
- Пономаренко А. В., Кулабухов В. С., Халтобин В. М., Ключников А. А., Левин Д. Н.** Исследования и испытания автоматизированных систем обучения для подготовки инженерно-технического и летного состава самолетов и вертолетов. № 10.
- Рутковский В. Ю., Суханов В. М., Глумов В. М.** Некоторые задачи управления свободнолетающими космическими манипуляционными роботами. Часть I. № 10; Часть II. № 12.
- Сапунков Я. Г.** Решение задачи оптимального управления космическим аппаратом с ограниченной и импульсной тягой в KS -переменных. № 3.
- Сафонов В. В., Поршнев В. А., Жебраков А. С.** Выбор эффективных вариантов энергосиловых установок методом гипервекторного ранжирования. № 11.
- Сильвестров М. М., Котицын Л. О., Ползик В. П., Бегичев Ю. И.** Формирование и исследование эргатического интерфейса информационно-управляющего комплекса перспективного многоцелевого вертолета. № 10.
- Сильвестров М. М., Федоров А. В., Котицын Л. О., Бегичев Ю. И., Наумов А. И.** Концепция построения эргатического комплекса управления многоцелевыми беспилотными летательными аппаратами. № 3.
- Солдаткин В. В., Никитин А. В.** Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного комбинированного аэрометрического приемника. № 6.
- Федунов Б. Е.** Интеллектуальная поддержка экипажа на борту антропоцентрического объекта. № 2.
- Челноков Ю. Н., Панкратов И. А.** Переориентация орбиты космического аппарата, оптимальная в смысле минимума интегрального квадратичного функционала качества. № 8.

CONTENTS

Filimonov N. B. The Problem of Quality of Control Processes: Change of an Optimizing Paradigm 2

Evolution of criterion bases of problems of optimum control is discussed. The criticism of fully-developed paradigm of square-law optimization is resulted by known domestic and foreign scientists are reduced. The irreversible tendency of change classical – a square-law optimizing paradigm on modern – the polyhedral optimizing paradigm which is development of the classical concept of quality of control processes is shown.

Keywords: quality of managerial processes, criteria of an optimality, square-law optimization, polyhedral optimization

Stepanov O. A. Recurrent Estimation and Filtering: Prehistory and Present Days 10

The prerequisites for obtaining the recurrent optimal estimation procedure known as the Kalman Filter are briefly outlined. Some trends of modern applied methods for solution of filtering problems are analyzed. The main facts from the biography of R.E. Kalman are presented. His relations with Russian scientists are discussed.

Keywords: Kalman filter, history creation, filtering, estimation, modern algorithms, R. E. Kalman, Russian scientists

Vittikh V. A. Complex Artificial Systems: Control and Modeling Problems 17

The following problems of management and simulation in complex artificial systems are formulated: the building of ontological, phenomenological models of situations and solving of problems defined in open form. It is proposed to look for approaches to solving of these problems in the framework of paradigm of limited rationality of decision making. The paradigm postulates the research on the edge of natural and humanitarian fields of science. This should bring human (excluded from the theory as a result of using of principles of classical rationality in artificial sciences) back to the theory.

Keywords: complex artificial system, organization, holon, actor, communication, selforganization, situation, uncertainty, phenomenology, ontology, problems defined in open form, real time system

Rzevski G. A. Complexity Science and Agent Technology: Methodology for Practical Applications 23

The paper outlines a methodology for applying complexity science and agent technology to practical large scale commercial, social and engineering problems. The methodology is derived from a decade of experience in designing and implementing systems for real-time scheduling of taxis, car rentals, seagoing tankers and trucks; dynamic data mining; dynamic knowledge discovery and semantic search. The methodology has also been used for designing adaptive engineering systems and for research into social issues such as eradication of poverty.

Keywords: complexity, emergence, self-organization, adaptability, co-evolution, real-time scheduling

Skobelev P. O. Multi-Agent Techology for Industrial Applications: Towards 20 years Anniversary of Samara Scientific School of Multi-Agent Systems 33

Multi-agent technologies and their industrial applications developed in cooperation of Samara research institutes of Russian Academy of Science and industria companies are presented. The Swarm-based features of developed systems are discussed based on fundamental principles of self-organization and evolution similar to living organisms. Applications for mobile resource scheduling and optimization, text understanding and data mining and some others are considered.

Keywords: multi-agent technology, self-organization and evolution, collective intelligence, dynamic scheduling, text understanding, data mining, industrial applications

Kaliaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Self-Organizing Systems of Group Control by Intelligent Robots 47

The paper deals with self-organizing system of group control by actions of intelligent robots, to achieve their goal. The algorithm of the system control panel is formed on the basis of expertise, and relevant laws of nature. The proposed approach is demonstrated for the move on the surface of a body by a group of intelligent transport robots with radial thrust vector. Simulation results.

Keywords: intelligent mobile robot, group, group control, self-organization, cluster

Rutkovsky V. Yu., Sukhanov V. M., Glumov V. M. Some Problems of Control by Free Space Manipulation Robots. Part II	54
---	----

Short analysis of some foreign authors' papers in the topic of control by free-flying space manipulation robots (SMR) is presented. Some problems of the SMR in one meaning or another optimal functioning are considered. Specifically the tasks of the payload optimal capture with next leading of the cluster SMR-payload to a configuration with minimum of the system inertia moment are investigated. Some tasks of control by the SMR trajectory motion are considered and the conditions that guarantee the SMR safe maneuvering near the served object surface are formulated. Composed system of energy economy control by SMR is suggested. This system is based on the motion momentum variation of the manipulator links for the SMR case attitude control. A number of problems that are connected with the influence of the payload flexibility on the SMR orientation system are considered.

Keywords: space manipulation robot, optimization, flight trajectory, safety functioning, construction flexibility, estimation, identification, orientation control, algorithms of adaptation

Matveev V. V., Raspopov V. J., Lihosherst V. V. Attitude Control System of Unmanned Airborne Vehicle with the Video Observation Channel	66
--	----

The capability of accuracy increase at angular co-ordinates definition of a unmanned airborne vehicle due to an integration strapdown attitude control system and video observation channel is demonstrated.

Keywords: strapdown system of orientation, unmanned aircraft vehicle, micromechanical gyroscope, video camera

Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M. The Variation Estimation of Parameters of Space Vehicles Movement Due to Criterion of Maximum Verisimilitude	70
--	----

One considers the application of the variation approach for the decision of problems of navigating estimation of parameters of space vehicles movement by criterion of the maximum verisimilitude on the basis of the joint processing of the measuring data of onboard navigating equipment of the consumer working on signals of satellite radio navigating system. The numerical example is resulted.

Keywords: statistical estimation, nonlinear dynamic systems, criterion of the maximum credibility, navigation of space vehicles

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *T. N. Погорелова*.
Технический редактор *E. B. Конова*. Корректор *E. B. Комиссарова*.

Сдано в набор 30.09.2010. Подписано в печать 17.11.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,25. Заказ 949. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15