



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

**6 номеров в год
ISSN 1819-3161**

УЧРЕДИТЕЛЬ

**Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН**

**Главный редактор
Д.А. Новиков**

**Заместители главного
редактора**

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пащенко

**Редактор
Т.А. Гладкова**

**Выпускающий редактор
Л.В. Петракова**

**Издатель
ООО «СенСидат-Контрол»**

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 104.
Тел./факс (495) 330-42-66,
тел. (495) 334-92-00

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

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ООО «ЭЛЕКТРОНИНФОРМ»

Отпечатано с готовых диапозитивов
в типографии ГКС

Подписано в печать
31.07.2006 г.

Заказ № РВ406

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

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

Журнал входит в Перечень ВАК
(Бюл. ВАК. — 2004. — № 3)

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

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

4.2006

СОДЕРЖАНИЕ

Институту автоматизации и процессов управления Дальневосточного
отделения РАН — 35 лет 2

Анализ и синтез систем управления

Абрамов О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохас-
тических систем 3

Филаретов В. Ф. Разработка и исследование методов синтеза высоко-
точных систем управления сложными динамическими объектами
в условиях параметрической неопределенности 9

Жирабок А. Н., Летенко А. А. Логико-динамический подход к диаг-
ностированию билинейных систем 20

Торгашов А. Ю. Итерационный синтез робастного многомерного
ПИД-регулятора для управления реакционно-ректификационной
колонной 26

Искусственный интеллект

Гаврилова Т. Л., Клещев А. С. Внутренняя модель математической
практики для систем автоматизированного конструирования доказа-
тельств теорем. Ч. 1. Общее описание модели 32

Грибова В. В. Проблемно-независимый генератор текстов, управ-
ляемый онтологией 36

Управление подвижными объектами

Дорожко В. М., Лебедева А. Н. Экспертные представления об основных
ситуационных моделях коллективного движения судов 43

Девятисильный А. С., Кислов Д. Е. Исследование разрешимости задач
определения спутниковых орбит по измерениям 50

Девятисильный А. С., Числов К. А. К задаче выставки инерциальной
навигационной системы на неподвижном основании в условиях гра-
витационной неопределенности. 54

Информационные технологии в управлении

Кульчин Ю. Н., Денисов И. В., Панов А. В., Рыбальченко Н. А.
Применение перцептронов для нелинейной реконструктивной томо-
графии 59

Артемьева И. Л., Гаврилова Т. Л., Грибова В. В. и др. Мультидис-
циплинарная система управления информационными ресурсами
различных уровней общности 64

Киншт Н. В., Петрунько Н. Н. Логические формализмы обработки
данных электромагнитной обстановки высоковольтной подстанции. . 69

* * *

Contents and abstracts 75



ИНСТИТУТУ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВО РАН – 35 ЛЕТ

В июне 2006 года Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения РАН отметил свое 35-летие.

Институт был образован в 1971 году на базе отдела технической кибернетики Дальневосточного филиала Сибирского отделения АН СССР (заведовал отделом проф. И. Д. Кочубиевский) и Объединенного вычислительного центра вузов г. Владивостока и Дальневосточного филиала СО АН СССР, которым руководил профессор В. В. Здор. У истоков создания ИАПУ ДВО РАН стояли академик-секретарь Отделения механики и процессов управления АН СССР академик Б. Н. Петров, директор Института проблем управления АН СССР академик В. А. Трапезников и многие другие выдающиеся ученые в области теории и практики автоматки и управления.

Первым директором Института стал известный ученый в области теории управления, лауреат Ленинской премии академик А. А. Воронов, под руководством которого сформировался научный коллектив и произошло становление основных направлений исследований. Яркий и разносторонний талант А. А. Воронова привлек в Институт многих известных ученых, в числе которых профессор Ф. Г. Старос — один из родоначальников отечественной микроэлектроники и М. Д. Агеев — выдающийся ученый в области подводной робототехники, ставший впоследствии академиком РАН и создавший одни из лучших в мире автономные обитаемые подводные аппараты. Впоследствии Институт возглавил профессор В. Л. Перчук, который стимулировал развитие исследований в области компьютерных вычислительных технологий и моделирования. Долгие годы Институтом руководил известный ученый, специалист в области математики и механики академик В. П. Мясников. На этом посту его сменил член-корреспондент РАН В. Г. Лифшиц, широко известный как у нас в стране, так и за рубежом специалист в области физики поверхности. Оба они оставили после себя в Институте плодотворно работающие научные школы.

Сегодня Институт занимает ведущие позиции на Дальнем Востоке России в области физико-математических и технических наук. Численность Института превосходит 300 человек, в его штате состоят один академик и три члена-корреспондента РАН, 24 доктора, более 60 кандидатов наук и много молодых ученых, которые ведут исследования не только по автоматке и управлению, но и в таких областях, как математическое моделирование сложных систем, информатика, механика, квантовая и оптическая электроника, физика поверхности твердых тел и нанотехнологии. Коллектив Института много сделал для разработки и освоения передовых технологий в различных отраслях производства Дальнего Востока. В последние годы Институт развивается как центр науки и образования, генератор идей и новых интеграционных форм. На базе Института создано четыре Центра коллективного пользования ДВО РАН, которые являются центрами интеграции научных коллективов ряда институтов ДВО РАН и университетов региона, что позволяет активно вовлекать молодежь в научный процесс. Институт ведет работы по программам фундаментальных исследований Президиума и отделений РАН, многочисленным грантам РФФИ и совместным проектам с институтами Сибирского и Уральского отделений РАН, а также по заданиям федеральных и региональных органов государственной власти, активно участвует в развитии инновационных процессов.

Представленные в настоящем номере журнала статьи, безусловно, не отражают полную картину выполняемых в Институте научных исследований. Это лишь некоторые ее фрагменты. Более подробную информацию можно найти на сайте Института www.iacr.dvo.ru, либо в ежегодно публикуемых отчетах о научных исследованиях. Вместе с тем мы надеемся, что публикуемые статьи окажутся интересны и полезны читателю и будут способствовать развитию научного сотрудничества.

Ю. Н. Кульчин

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

О. В. Абрамов

Рассмотрена проблема синтеза аналоговых технических систем с детерминированной структурой и случайными параметрами. Введено расширенное понятие параметрического синтеза, результатом которого должна быть некоторая стратегия управления параметрами, обеспечивающая требуемые или оптимальные характеристики надежности синтезируемой системы. Обсуждены параллельные алгоритмы решения возникающих при этом задач многовариантного анализа и оптимизации.

ВВЕДЕНИЕ

В традиционном понимании задача параметрического синтеза сводится к выбору таких значений параметров элементов системы (при заданной ее структуре), при которых выполняются условия работоспособности [1]. Учет возможных отклонений параметров от полученных расчетных значений и разработка мероприятий, обеспечивающих работоспособность системы при наличии таких отклонений, переносятся на последующие этапы проектирования (а иногда на этапы производства и эксплуатации). Такой подход к задаче параметрического синтеза наиболее распространен на практике. Найденный при этом вектор внутренних параметров позволяет говорить только о том, что «номинальный» проект работоспособен.

Отклонения параметров от расчетных (номинальных) значений могут привести к потере работоспособности, поэтому можно попытаться найти в некотором смысле оптимальные значения внутренних параметров (например, которые обеспечивают наибольший запас работоспособности или максимальную вероятность выполнения условий работоспособности).

Выбор оптимальных значений параметров не всегда позволяет создать систему с требуемыми потребительскими свойствами, т. е. обеспечить заданное качество ее функционирования. Определив номинальные значения параметров, при кото-

рых обеспечивается максимальная вероятность безотказной работы объекта в течение определенного промежутка времени $P_{\max}(T)$, и сравнив полученное значение с требуемым $P_{\text{тр}}(T)$, разработчик не может считать процесс проектирования законченным, если оказалось, что $P_{\max}(T) < P_{\text{тр}}(T)$. В этом случае необходимо искать пути дальнейшего улучшения решения. Требуемую гарантию работоспособности можно обеспечить настройкой или регулировкой некоторых параметров. Таким образом, для обеспечения требуемого качества функционирования объекта необходимо выбрать и реализовать некоторую стратегию управления его параметрами.

В дальнейшем будем говорить о *параметрическом синтезе в узком смысле*, понимая под этим определение номинальных значений параметров системы без учета вариаций параметров, и *параметрическом синтезе в широком смысле* (ПСС), результатом которого является некоторая стратегия управления параметрами системы.

Основное содержание методологии параметрического синтеза в широком смысле составляют ответы на следующие три взаимосвязанных вопроса: какие параметры выбрать в качестве управляемых; когда необходимо осуществлять управление; какие значения должны принять управляемые параметры.

1. ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В ШИРОКОМ СМЫСЛЕ

Параметрический синтез начинается с выбора некоторых исходных значений параметров элементов системы $x_{1\text{ном}}^{(0)}, x_{2\text{ном}}^{(0)}, \dots, x_{n\text{ном}}^{(0)}$, при кото-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (05-08-013998) и ДВО РАН (Программа № 16 ОЭММПУ РАН).

рых выполняются условия работоспособности. Эти условия задаются обычно в виде ограничений на выходные параметры:

$$A_j \leq y_j(\mathbf{x}, \mathbf{Q}) \leq B_j, \quad j = 1, m. \quad (1)$$

Здесь $y_j(\mathbf{x}, \mathbf{Q})$ — j -й выходной параметр, являющийся некоторой функцией внутренних $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ и внешних $\mathbf{Q} = (q_1, \dots, q_r)$ параметров; A_j и B_j — верхняя и нижняя границы допустимых изменений j -го выходного параметра (технические требования), задаваемые в техническом задании.

Исходные значения параметров выбираются без учета возможных отклонений параметров от расчетных (необходимые для этого данные еще отсутствуют), и их выбор можно назвать *параметрическим синтезом нулевого уровня*. На этом этапе синтеза вопрос о выборе управляемых параметров не возникает, так как конечным его результатом должны быть номинальные значения всех параметров.

Найдя вектор параметров $x_{\text{ном}}^{(0)}$, обеспечивающий выполнение условий работоспособности, можно попытаться улучшить полученное решение путем его коррекции. Параметры можно оптимизировать без привлечения дополнительной информации, если при выбранных значениях параметров в качестве целевой функции принять запас работоспособности или некоторую меру отклонения поведения системы от идеального. Задача будет состоять в выборе такого вектора внутренних параметров $x_{\text{ном}}^{(1)}$, что запас работоспособности (отклонение вектора выходных параметров от границ области работоспособности) максимален, или таких параметров, при которых, например, интегральная ошибка, служащая мерой отклонения поведения объекта от желаемого, минимальна. В качестве оптимизируемых (управляемых) параметров выбираются внутренние параметры, которые можно изменять на данном этапе синтеза. В общем виде задача обычно записывается следующим образом: $\max F(\mathbf{x}, \mathbf{Q}), \mathbf{x} \in D, \mathbf{Q} \in E$, где целевая функция $F(\mathbf{x}, \mathbf{Q})$ и функция ограничения — нелинейные функции управляемых параметров; D — область допустимых изменений внутренних параметров, являющаяся отображением условий работоспособности в пространство внутренних параметров. При оптимизации выбираются либо номинальные значения внешних параметров, либо такие, которые следуют из принципа наилучшего случая.

Выбор оптимальных значений внутренних параметров, осуществляемый без учета производственных и эксплуатационных изменений параметров, будем называть *параметрическим синтезом первого уровня*.

Параметрический синтез первого уровня является шагом вперед по сравнению с параметриче-

ским синтезом нулевого уровня, так как в результате получаем решение, обеспечивающее некоторый запас работоспособности при возможных отклонениях действительных значений параметров от расчетных. Это решение оптимально и вполне оправданно в условиях, когда информация о закономерностях отклонений параметров от расчетных (номинальных) значений полностью отсутствует.

Выбор параметров на этапах параметрического синтеза нулевого или первого уровней позволяет определить режимы работы элементов системы, выбрать их типонамины, классы точности и получить информацию о закономерностях возможных отклонений параметров от расчетных данных. После этого появляется возможность проверить выполнение требований к качеству функционирования с учетом этих отклонений.

Отклонения параметров возникают под влиянием факторов, действующих в процессе производства, хранения и эксплуатации, и имеют случайный характер. Поэтому внутренние параметры следует рассматривать как некоторые случайные функции времени. Следовательно, условия работоспособности могут быть удовлетворены лишь с определенной вероятностью

$$P(T) = P\{X(t) \in D, \forall t \in [0, T]\},$$

где $X(t)$ — случайный процесс изменения внутренних параметров, T — заданное время функционирования системы. Выбранные номинальные значения параметров можно рассматривать как компоненты вектора математических ожиданий случайного процесса $X(t)$ в начальный момент времени $t = 0$, т. е. $x_{\text{ном}}^{(1)} = M[X(0)]$.

Если при выбранных на предыдущих этапах номинальных значениях внутренних параметров вероятность выполнения условий работоспособности в течение заданного времени $P(T, x_{\text{ном}}^{(1)})$ окажется ниже требуемой $P_{\text{тр}}(T)$, необходимо перейти к *параметрическому синтезу второго уровня*, под которым будем понимать выбор номинальных значений параметров с учетом закономерностей их производственных и эксплуатационных вариаций [2].

Параметрический синтез второго уровня состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров, при которых обеспечивается максимальная гарантия работоспособности (максимальная вероятность безотказной работы в течение заданного времени или максимальная наработка до отказа, а при отсутствии сведений о закономерностях временного дрейфа — максимальная серийнопригодность и др.).

Пространство управляемых параметров совпадает здесь с пространством управляемых параметров параметрического синтеза первого уровня, од-



нако в некоторых случаях для уменьшения трудоемкости расчетов имеет смысл ограничить число оптимизируемых параметров.

Таким образом, параметрический синтез второго уровня представляет собой задачу оптимизации при стохастических критериях. Результатом ее решения являются значения внутренних параметров

$$x_{\text{ном}}^{(2)} = \arg \max P\{X(t) \in D, \forall t \in [0, T]\}, x \in D_y,$$

где D_y — пространство управляемых параметров. Если при выбранных в процессе параметрического синтеза второго уровня значениях параметров вероятность безотказной работы (или какой-либо другой стохастический критерий) не удовлетворяет предъявляемым требованиям, переходим к параметрическому синтезу следующего уровня.

Повышение вероятности выполнения условий работоспособности может быть достигнуто, если некоторые из внутренних параметров системы сделать настраиваемыми (регулируемыми). Синтез настраиваемых систем будем называть *параметрическим синтезом третьего уровня*. В процессе этого синтеза самостоятельное значение приобретает задача выбора совокупности параметров, с помощью которых наиболее целесообразно осуществлять настройку управляемых параметров и рациональных диапазонов их изменения. После ее решения возникает задача выбора оптимальных значений управляемых параметров, устанавливаемых при настройке.

Задача однократной настройки, решаемая в процессе параметрического синтеза третьего уровня, не всегда обеспечивает необходимое качество синтезируемой системы.

Следующим уровнем параметрического синтеза является синтез системы с многократно корректируемыми параметрами. Назовем его *параметрическим синтезом четвертого уровня*. Его цель — дать ответ на все поставленные выше вопросы, какие параметры, когда и как (на какую величину) надо изменить, чтобы обеспечить заданные требования к качеству функционирования системы (вероятность выполнения работоспособности в течение времени эксплуатации T , среднюю наработку $T_{\text{ср}}$ и т. д.).

При параметрическом синтезе четвертого уровня оптимизация параметров осуществляется в целях предупреждения потери работоспособности и носит характер профилактических коррекций [3]. Для настраиваемых систем необходимо выбрать совокупность параметров настройки (регулируемых параметров), определить целесообразные моменты проведения профилактических коррекций (настроек) параметров, дать рекомендации по выбору оптимальных значений корректируемых параметров. Для ненастраиваемых систем необ-

можно назначить сроки профилактических мероприятий (изменений параметров), дать рекомендации по отысканию элементов, подлежащих замене, и определить параметры элементов замены.

На этом уровне синтеза необходимо различать системы первой группы, параметры которых не контролируются в процессе эксплуатации, и второй группы, имеющие средства контроля. Моменты изменения и оптимальные значения управляемых параметров для первой группы систем определяются по априорным сведениям о процессах эксплуатационных изменений параметров и вследствие этого справедливы для всего ансамбля однотипных систем (носят групповой характер), для систем второй группы — определяются на основании априорных данных и результатов контроля параметров конкретной системы. Полученные при этом рекомендации будут справедливы только для конкретной системы, и стратегия управления параметрами в этом случае строго индивидуальна. При этом может возникнуть необходимость определения и целесообразных моментов (сроков) проведения контрольных измерений.

Приведем в общем виде постановки некоторых типовых задач оптимального ПСШ.

1. *Задача оптимального выбора номиналов*. При известных характеристиках $X(t)$ и заданных D и T найти такие неслучайные, корректирующие исходные номиналы, значения E_1, E_2, \dots, E_n , при которых

$$P\{(X_1(t) + E_1, X_2(t) + E_2, \dots, X_n(t) + E_n) \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P.$$

2. *Задача оптимальной настройки*. При известных характеристиках случайных процессов изменения нерегулируемых $X_1(t), \dots, X_k(t)$ и регулируемых $X_{k+1}(t), \dots, X_n(t)$ параметров найти такие E_{k+1}, \dots, E_n , при которых

$$P\{(X_1(t), \dots, X_k(t), X_{k+1}(t) + E_{k+1}, \dots, X_n(t) + E_n) \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P.$$

3. *Задача оптимального планирования профилактик (технического обслуживания)*:

— *априорное планирование профилактик*: при известных характеристиках априорного случайного процесса $X^{Pr}(t)$, заданных области допустимых значений параметров D и времени T найти такую неслучайную функцию $E(t)$, при которой $P\{(X_1^{Pr}(t) + E_1(t), \dots, X_n^{Pr}(t) + E_n(t)) \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P$ при условии $C(t) \leq C_0$, где $C(t) = \int_0^T C(E(t))dt$ — затраты, связанные с проведе-

нием коррекции параметров (технического обслуживания); C_0 — допустимый уровень затрат;

— *апостериорное (индивидуальное) планирование профилактики*: при известных характеристиках апостериорного случайного процесса $X^{P_s}(t)$, получаемого из априорного с учетом результатов контроля, заданных D и T , найти такую функцию $E(t)$, при которой

$$P\{(X_1^{P_s}(t) + E_1(t), \dots, X_n^{P_s}(t) + E_n(t)) \in D, \\ \forall t \in [0, T]\} = \max P \text{ при } C_1(t) \leq C_0,$$

где $C_1(t)$ — затраты, связанные с проведением контроля и коррекций параметров.

Анализируя приведенные постановки задач, нетрудно убедиться в их принципиальной общности, причем задачи типа 1 и 2 — частные случаи задачи 3. По своей сути все они относятся к классу задач управления случайными процессами. Их решение должно основываться на результатах прогнозирования процесса дрейфа параметров (технического состояния) и надежности оптимизируемых систем. При разработке методов прогнозирования и управления необходимо учитывать как специфику случайных процессов (они относятся к классу нестационарных и локально управляемых), так и особенности самого управления (импульсная коррекция).

Сложность задач ПСШ не позволяет надеяться на получение аналитических решений. Пригодные для практики аналитические решения удается получить лишь в отдельных простых случаях. Попытки усложнения исходных постановок приводят к результатам, представляющим, в основном, академический интерес и носящим скорее методологический, чем практический характер.

Потребности практики заставляют обратиться к методам численного решения задач ПСШ на базе современных информационных технологий и средств вычислительной техники. В их основе лежат идеи физического и математического моделирования процессов функционирования технических систем, использования параллельных и распределенных моделей вычислений.

И, наконец, одна из наиболее важных и сложных проблем, возникающих при решении задач параметрического синтеза, — априорная неопределенность закономерностей дрейфа параметров объекта, условий эксплуатации, ошибок измерений и контроля. Это заставляет строить методику параметрического синтеза в виде набора («веера») стратегий, позволяющих принимать решения при тех объемах исходной информации, которой пользователь реально может располагать, применяя принципы адаптации, минимакса и робастной статистики.

2. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Основные трудности, возникающие при решении задачи параметрического синтеза технических систем с учетом случайных вариаций их параметров, связаны с высокой вычислительной трудоемкостью возникающих при этом задач многовариантного анализа и оптимизации по стохастическим критериям. На каждом шаге оптимизации возникает необходимость проведения статистического анализа для получения оценки критерия оптимальности. При этом на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло) многократно рассчитывается исследуемая система (устройство) при различных значениях параметров элементов. Число расчетов N , равное числу реализаций случайного вектора параметров, определяется из условия обеспечения необходимой точности оценки критерия. Для обеспечения удовлетворительной точности оценки необходимо на каждом шаге поиска выполнять полный расчет системы от нескольких сотен до тысяч раз.

Высокая вычислительная трудоемкость решения оптимизационных задач со стохастическим критерием заставляет искать способы достаточно быстрого получения желаемых результатов. В работах [2, 4] были предложены некоторые методы и алгоритмы, упрощающие в известной мере процедуру поиска оптимальных решений в задаче параметрического синтеза. Сравнительный анализ и эксперименты показали, что их применение позволяет сократить время решения задачи в 3—5 раз по сравнению с классическими методами, основанными на прямом методе статистического моделирования.

В последние годы стал активно развиваться достаточно радикальный путь сокращения трудоемкости решения сложных вычислительных задач, в основе которого лежит идея распараллеливания процессов поиска конечного результата. Параллельный подход приводит к самым разнообразным вариантам архитектуры высокопроизводительных вычислительных комплексов. В качестве параллельных вычислителей широко используются открытые системы массового параллелизма, состоящие из стандартных компонентов, в том числе массовых серийных микропроцессоров. Для создания подобных кластерных компьютеров сформировался как рынок аппаратных средств, так и требуемый для распределенной обработки набор программных компонентов, состоящий из некоммерческого свободно распространяемого программного обеспечения. Возникает естественная проблема — как наилучшим образом использовать имеющиеся аппаратные средства для решения конкретной вычислительной задачи.



Реализация задач анализа и оптимизации подразумевает отображение всей вычислительной схемы, включая методы многовариантного детерминированного и статистического анализа, а также оптимизации по стохастическим критериям на параллельную архитектуру кластера, учитывая топологию межпроцессорных связей и обеспечивая правильность взаимодействия множества параллельно выполняющихся независимо друг от друга процессов.

Представим программную среду для решения задач ПСШ в виде набора следующих взаимосвязанных программно-алгоритмических модулей.

- *Модуль ввода описания проектируемой системы в ЭВМ.* При его создании необходимо обеспечить простоту описания для пользователя и простоту перевода описания с языка пользователя на язык ЭВМ.
- *Средства преобразования описания системы в математическую модель.* В их основе — процедуры составления и формирования уравнений, образующих описание процессов функционирования системы.
- *Модуль детерминированного анализа.* Для выбранной структуры (топологии) и заданных значений внутренних параметров $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{n\text{ном}})$ здесь вычисляются значения выходных параметров системы $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$, $y_j = F_j(x_1, \dots, x_n)$. Этот этап, по сути, состоит в решении систем уравнений, при этом может возникнуть необходимость выбора метода решения и параметров вычислительного алгоритма (шага интегрирования, параметров останова и т. д.). Поскольку обращение к этому модулю многократно, здесь уместен диалоговый (интерактивный) режим организации вычислительного процесса на стадии настройки и организация параллельного процесса вычислений, что особенно важно для последующих этапов многовариантного детерминированного и статистического анализа, а также оптимизации.
- *Модуль статистического анализа.* Он включает в себя алгоритмические и программные средства генерации случайных процессов изменения внутренних параметров $X(t)$ и вычисления целевой функции методом статистических испытаний (Монте-Карло). Высокая вычислительная трудоемкость этого метода, а также необходимость многократного вычисления значений целевой функции в процессе поисковой оптимизации вызывает необходимость разработки параллельного аналога метода Монте-Карло. Один из вариантов параллельного алгоритма статистических испытаний приведен в работе [5].
- *Модуль оптимизации.* Он включает в себя набор алгоритмических и программных средств

поиска номинальных значений параметров $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{n\text{ном}})$, доставляющих максимум целевой функции.

В процессе проектирования технических объектов наиболее часто встречаются оптимизационные задачи со следующей формулировкой: найти экстремум целевой функции $\Phi(x)$ в области работоспособности, в которой целевая функция и функции-ограничения являются нелинейными функциями управляемых параметров. Классические методы нахождения экстремумов целевых функций здесь практически не применяются, так как случаи аналитического задания функций в задачах ПСШ крайне редки, а используются обычно математические модели, заданные алгоритмически. В связи с этим определение значений целевых функций, функций-ограничений и их градиентов возможно только алгоритмически путем численного решения систем уравнений и подсчета функционалов. В такой ситуации применяют методы поисковой оптимизации. Распараллеливание этих методов является одним из путей снижения трудоемкости решения задач параметрического синтеза.

Здесь можно применить различные стратегии. Одна из них состоит в применении параллельных аналогов методов случайного поиска, относящихся к методам иерархической оптимизации. В простейших случаях процедура случайного поиска генерирует в некоторой окрестности поисковой переменной ее случайные приращения, вычисляет значение оптимизируемой функции, сравнивает с ее значениями на предыдущем шаге поиска и, в зависимости от результата (приближения или удаления от экстремума), либо повторяет предыдущий шаг, либо генерирует новые случайные приращения поисковой переменной. Далее все повторяется. Здесь случайный поиск можно рассматривать как реализацию простейшего оптимизационного метода «проб и ошибок».

В более сложных случаях алгоритм метода случайного поиска обладает свойством адаптивности, реализуемым с помощью запоминания как траектории поискового процесса (значений поисковых переменных и целевых функций, а также соответствующих ограничений), так и параметров самого алгоритма (размеры и направления поискового шага и т. п.). Именно это свойство делает его эффективным средством решения сложных экстремальных задач, к числу которых принадлежат и задачи параметрического синтеза.

Другая стратегия заключается в создании параллельных модификаций классических методов поиска (градиентного, квазиньютоновского и др.), положительно зарекомендовавших себя при решении экстремальных задач. В качестве примера можно рассмотреть метод Хука—Дживса. Он состоит из шагов исследующего поиска вокруг базо-

вой точки, за которой в случае успеха следует поиск по образцу. Во время поиска вокруг базовой точки происходит «нащупывание» направления движения в сторону экстремума. При поиске по образцу происходит движение в выбранном направлении, причем оно в некоторых пределах корректируется. Алгоритм Хука—Дживса является последовательным. Распараллеливание здесь основывается на декомпозиции алгоритма и применении схемы «главный—подчиненный», являющейся одной из парадигм параллельного программирования. Главный отвечает за работу алгоритма поиска экстремума, за раздачу заданий подчиненным на этапе декомпозиции. Подчиненный получает от главного пакет с заданием об обработке нескольких точек и поиска такой точки, значение функции в которой экстремально. При использовании схемы «главный—подчиненный» возможна ситуация, когда мастер простаивает, так как объем работ для разных процессоров или локальных станций может быть различным. Это обеспечивает неравномерную загрузку участников вычислений. Поэтому осуществлять ее необходимо динамически по мере освобождения элементов вычислительной системы.

Следующей идеей может стать применение параллельного аналога — метода сканирования (слепого поиска). Наиболее простой алгоритм поиска экстремума методом сканирования (последовательного поиска на сетке переменных) заключается в том, что по каждой независимой переменной задаются приращения в соответствующем порядке, обеспечивающем заполнение всей исследуемой области равномерной и достаточно густой сеткой. Так, для поиска экстремума функции двух переменных сначала при фиксированном значении одной переменной рассчитываются значения функции для всего диапазона изменения второй независимой переменной и фиксируется значение экстремума. Затем первая переменная изменяется на размер заданного шага и расчеты повторяются при варьировании второй переменной и т. д. Для произвольного числа переменных шаг по следующей переменной производится после завершения цикла по предыдущей.

Основное достоинство метода сканирования при достаточно густом расположении точек — всегда гарантируется отыскание глобального экстремума. Однако для этого требуется значительный объем вычислений, снизить который можно путем распараллеливания алгоритма либо распределения вычислений по станциям локальной вычислительной сети. Для поиска экстремума каждым подчиненным процессором или станцией локальной вычислительной сети производится расчет значений целевой функции для заданного заранее подмножества проверяемых точек и фик-

сируется значение экстремума для своей группы точек. Главный процессор или станция запоминает переданные значения. Для обеспечения такой возможности должна быть образована локальная база поисковых данных для своевременного пополнения результатами вычислений. На конечном этапе из поисковой базы данных выбирается экстремальное значение целевой функции.

При данном параллельном алгоритме время вычислений по сравнению с последовательным методом существенно сокращается. Важный момент предлагаемого алгоритма состоит в том, что процессоры и станции локальной сети могут быть как однотипными, так и отличающимися друг от друга по своим вычислительным характеристикам. Как результат, выполнение испытаний на процессорах не синхронизируется, и выполнение итераций глобального поиска на каждом процессоре может выполняться в произвольном темпе. Такая схема повышает надежность вычислений, устраняется возможность блокировки системы. Более того, при таком подходе можно сохранить возможность продолжения вычислений даже при выходе из строя одного или нескольких процессоров или станций локальной сети.

В заключение отметим, что применение технологии параллельных вычислений еще не гарантирует получение результата в приемлемое время. Могут возникнуть ситуации, например, при решении задачи поиска экстремума методом сканирования (полного перебора), когда число вариантов становится слишком велико. Необходим поиск путей, позволяющих повысить эффективность алгоритмов многовариантного анализа и оптимизации. Так, одним из универсальных средств ускорения перебора является быстрое отсеечение ложных (или вероятно ложных) ветвей перебора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления* / Под ред. А. А. Воронова, И. А. Огурка. — М.: Наука, 1984.
2. *Абрамов О. В.* Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. — М.: Наука, 1992.
3. *Абрамов О. В., Бернацкий Ф. И., Здор В. В.* Параметрическая коррекция систем управления. — М.: Энергоиздат, 1982.
4. *Абрамов О. В., Катыева Я. В., Супоня А. А.* Эффективные методы параметрической оптимизации по стохастическим критериям // Тр. Междунар. конф. по проблемам управления / Фонд Проблемы управления. — М., 1999. — Т. 2. — С. 130—132.
5. *Абрамов О. В., Катыева Я. В.* Технология параллельных вычислений в задачах анализа и оптимизации // Проблемы управления. — 2003. — № 4. — С. 11—15.

☎ (4232) 31-02-02

e-mail: abramov@iacp.dvo.ru





РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ¹

В. Ф. Филаретов

Рассмотрена проблема управления сложными нелинейными динамическими объектами с переменными, а также неопределенными параметрами и воздействиями со стороны внешней среды. Предложен единый подход и несколько оригинальных методов синтеза многоуровневых самонастраивающихся, адаптивных и робастных систем управления, позволяющих обеспечивать высокое качество управления указанными объектами. Результаты моделирования подтверждены работоспособность и высокая эффективность синтезированных систем при работе в условиях неопределенности и существенной переменности параметров сложных динамических объектов.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена рассмотрению и решению проблемы управления сложными нелинейными динамическими объектами с несколькими степенями свободы (СС). При перемещении таких объектов по сложным пространственным траекториям возникают значительные взаимовлияния между всеми их СС, а также изменяющиеся взаимодействия с окружающей средой. Эти особенности приводят к существенному, быстрому и неконтролируемому изменению динамических свойств и параметров объектов. Проблема управления такими нестационарными объектами решалась многими авторами. Однако окончательного решения этой проблемы пока не найдено, и требуются новые эффективные пути и методы ее решения.

На примере управления высокоскоростным автономным подводным роботом (АПР) далее рассмотрен новый единый подход и предложено несколько оригинальных методов синтеза многоуровневых самонастраивающихся, адаптивных и робастных систем управления (СУ), позволяющих обеспечивать высокое качество (динамическую точность) управления объектами указанного типа. Синтезированные СУ, работая в реальном масш-

табе времени, обеспечивают этим сложным динамическим объектам высокое качество управления в условиях неопределенности и существенной переменности их параметров.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ АПР

Наиболее полная динамическая модель пространственного движения АПР представляется в виде шести сложных взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами, записанных в системе координат, связанной с корпусом АПР [1, 2]. Эти уравнения учитывают перекрестные связи и взаимовлияния между всеми степенями свободы АПР, присоединенные массы и моменты инерции жидкости, а также гидродинамические и гидростатические силы и моменты, действующие на него со стороны окружающей вязкой среды. В матричной форме указанная система шести уравнений записывается следующим образом:

$$\mathbf{M}(t)\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}, t)\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}, t)\mathbf{v} + \mathbf{F}_v = \boldsymbol{\tau}_d, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}(t) = \mathbf{M}(\xi(t)) \in R^{6 \times 6}$ — матрица инерции АПР; $\mathbf{C}(\mathbf{v}, t) = \mathbf{C}(\mathbf{v}, \xi(t)) \in R^{6 \times 6}$ — матрица кориолисовых и центробежных сил; $\mathbf{D}(\mathbf{v}, t) = \mathbf{D}(\mathbf{v}, \xi(t)) \in R^{6 \times 6}$ — матрица сил и моментов вязкого трения; $\mathbf{v} = (v_x, v_y,$

¹ Работа поддержана грантами РФФИ.

$v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \in R^6$ — вектор проекций линейной и угловой скоростей АПР на оси связанной с ним системы координат; $\tau_d = (\tau_{dx}, \tau_{dy}, \tau_{dz}, M_{dx}, M_{dy}, M_{dz})^T \in R^6$ — вектор сил и моментов, создаваемых двигателями АПР; $F_v = F_v(t) \in R^6$ — вектор внешних возмущений; $\xi \forall = \xi(t)$ — вектор ограниченной размерности, элементы которого содержат параметры АПР, изменяющиеся в процессе его движения (в частности, присоединенные массы и моменты инерции жидкости, коэффициенты вязкого трения и др.).

Поскольку движение АПР по пространственным траекториям происходит в абсолютной системе координат, то к уравнениям (1) добавляются кинематические соотношения, обеспечивающие преобразование из связанной в абсолютную систему координат [2, 3]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{v}, \quad (2)$$

где $\mathbf{x} = (x, y, z, \varphi, \psi, \theta)^T \in R^6$ — вектор положения и ориентации АПР в абсолютной системе координат; φ, ψ и θ — углы курса, дифферента и крена; $\mathbf{J}(\mathbf{x}) \in R^{6 \times 6}$ — матрица преобразования системы координат, элементами которой являются комбинации тригонометрических функций углов φ, ψ и θ .

Модель (1), (2) чрезвычайно сложна. Поэтому при синтезе СУ для рассматриваемого типа АПР можно применить два возможных подхода: разработать такие методы, которые позволят выполнять синтез системы управления АПР сразу на основе обобщенной модели (1), (2); для упрощения процедуры синтеза применять метод декомпозиции [4], согласно которому уравнения динамики (1) разбиваются на шесть сепаратных (локальных) систем, соответствующих отдельным степеням свободы АПР. Причем это не будет упрощением полной модели АПР, поскольку в каждой локальной системе полностью сохраняются и учитываются все взаимосвязи между всеми остальными пятью локальными системами, которые имеют место в процессе произвольного пространственного движения робота, а также все воздействия со стороны окружающей вязкой среды. В результате любая из трех локальных систем, соответствующих линейным степеням свободы АПР, может быть описана следующей системой уравнений (здесь индексы проекций на оси координат для простоты опущены):

$$\begin{aligned} \tau_d &= f(\omega_d, v_j), \\ m\dot{v} + d_1 v \sigma + d_2 v |v| \sigma' + f_v &= \tau_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где v — любая из проекций линейной скорости движения АПР на оси связанной системы координат; τ_d — тяга, создаваемая движительным комп-

лексом по соответствующей СС; $f(\omega_d, v_j)$ — нелинейная функция переменных ω_d и v_j , вид которой зависит от компоновки и параметров движительного комплекса; ω_d — угловая скорость вращения вала двигателя; v_j — скорость перемещения окружающей жидкости вдоль оси винта; f_v — обобщенная функция, включающая в себя все внешние воздействия на соответствующую локальную систему и воздействия со стороны других СС; m — масса робота с учетом присоединенной массы жидкости по соответствующей СС; d_1 и d_2 — гидродинамические коэффициенты, соответствующие линейной и квадратичной зависимостям сил вязкого трения от скорости движения АПР по каждой СС; σ и $\sigma' = (1 - \sigma)$ — вспомогательные коэффициенты, зависящие от режима обтекания жидкостью движущегося АПР ($\sigma = 1$, если $|v| < v_{кр}$, и $\sigma = 0$, если $|v| > v_{кр}$, $v_{кр}$ — граничное значение скорости).

Аналогичные уравнения (с точностью до обозначений) получаются и для любой из трех локальных систем, соответствующей вращательной степени свободы АПР.

Как показали многочисленные исследования, существенное влияние на динамику всего АПР в целом оказывает динамика его движительного комплекса. Поэтому при синтезе высокоточной системы управления АПР необходимо обязательно включать динамику этого комплекса в общую математическую модель, описывающую движение робота по пространственной траектории. В качестве базовой модели каждого двигателя была принята система уравнений, полученная в работе [5], которая учитывает наиболее важные особенности взаимодействия винта с окружающей вязкой жидкостью:

$$\begin{aligned} J_d \dot{\omega}_d + (K_m K_w / R_d) \omega_d + M_B &= (K_m K_y / R_d) u, \\ \tau_d &= F_\tau |\omega_d| s_\tau(\omega_d, v_p), \\ M_B &= F_m |\omega_d| (s_\tau(\omega_d, v_p) + H_{гд} C_r \omega_d), \\ s_\tau(\omega_d, v_p) &= (K_s + H_{гд}) \omega_d - v_p / 2 - \\ &- \text{sign}(\omega_d) \sqrt{(K_s \omega_d - v_p / 2)^2 + 2 H_{гд} K_s \omega_d^2}, \\ H_{гд} &= H + \delta_H \text{sign} \omega_d, \\ v_p &= \begin{cases} v_j, & \text{если } \text{sign} \omega_d = \text{sign} v_j, \\ 0, & \text{если } \text{sign} \omega_d \neq \text{sign} v_j, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_s = F_\tau / (4 \rho_j S_d)$ — постоянный коэффициент; $H_{гд}$ — гидродинамический шаг винта; H — геометрический шаг винта; δ_H — гидродинамическая поправка на шаг винта; F_τ, F_m — обобщенные коэффициенты упора и момента; C_r — коэффициент



профильных потерь винта; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность окружающей жидкости; $S_{\text{д}}$ — площадь диска винта; $J_{\text{д}}$ — момент инерции вращающихся частей движителя с учетом присоединенного момента инерции жидкости; $R_{\text{д}}$ — активное сопротивление якорной цепи электродвигателя; K_m и K_w — коэффициенты момента и противо-ЭДС электродвигателя постоянного тока; K_y — коэффициент усиления усилителя мощности; u — сигнал управления движителем соответствующей СС; s_{τ} — абсолютное скольжение винта; $M_{\text{в}}$ — момент на валу движителя; v_p — вспомогательная переменная.

Диапазоны возможных изменений параметров движителей и АПР определяются неравенствами: $J_{\text{дmin}} \leq J_{\text{д}} \leq J_{\text{дmax}}$, $F_{m\text{min}} \leq F_m \leq F_{m\text{max}}$, $m_{\text{min}} \leq m \leq m_{\text{max}}$, $d_{1\text{min}} \leq d_1 \leq d_{1\text{max}}$, $d_{2\text{min}} \leq d_2 \leq d_{2\text{max}}$, где индексами min и max обозначены наименьшие и наибольшие значения соответствующих параметров.

Поскольку для рассматриваемых кинематических схем АПР тяги $\tau_{\text{дx}}$, $\tau_{\text{дy}}$ и $\tau_{\text{дz}}$ по каждой поступательной СС создаются отдельными движителями, то введенная ранее функция $f_{\tau}(\omega_{\text{д}}, v_{\text{ж}})$ для каждого движителя полностью определяется правой частью второго уравнения системы (4). При иной схеме расположения движителей, а также для определения моментов $M_{\text{дx}}$, $M_{\text{дy}}$ и $M_{\text{дz}}$, создаваемых движительным комплексом по вращательным СС, достаточно несложного геометрического пересчета, никак не влияющего на предлагаемые и исследуемые ниже методы синтеза высококачественных СУ.

Математическая модель (1)–(4) представляет собой сложную нелинейную многомерную систему дифференциальных и алгебраических уравнений с переменными коэффициентами. Непосредственное использование этой модели (даже с учетом возможной декомпозиции на основе второго подхода) при синтезе СУ весьма затруднительно. Далее будут рассмотрены оба указанных выше подхода, использующих несколько оригинальных методов синтеза и несколько иерархических уровней управления в структуре единой СУ движением АПР.

2. ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОУРОВНЕВОЙ СУ

Для упрощения процедуры синтеза разрабатываемую обобщенную СУ пространственным движением АПР, синтезируемую на основе централизованной (1), (2) или децентрализованной (3) модели, целесообразно разделить на три отдельные подсистемы (уровня) управления. В результате эта СУ будет содержать три контура управления: движительным комплексом, скоростью движения и собственно положением (ориентацией) АПР. При

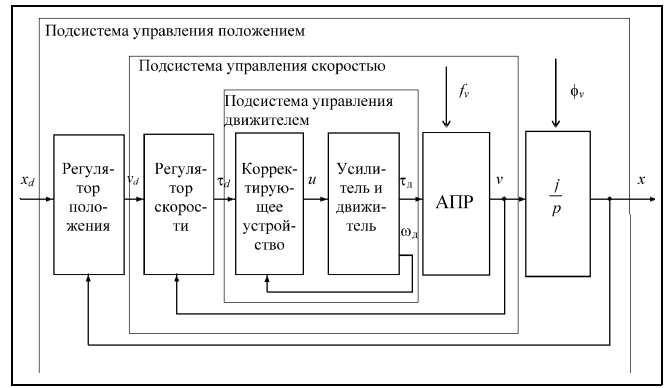


Рис. 1. Обобщенная схема СУ по одной степени свободы АПР:
 u — сигнал управления движителем; ϕ_v — перекрестные связи между соответствующими степенями свободы АПР, определяемые кинематическим соотношением (2); x_d , v_d и τ_d — соответственно, задающее воздействие по линейной координате АПР, по скорости его перемещения и по силе тяги движителя

этом появляется возможность в каждой подсистеме применять наиболее эффективные методы синтеза управляющих устройств и регуляторов, в максимальной степени учитывающие особенности соответствующих динамических объектов (ДО). Кроме того, в процессе разработки подходов и методов для синтеза СУ каждого уровня (контура) основной упор будет делаться на то, чтобы синтезируемые системы формировали такие управляющие сигналы (воздействия), которые максимально учитывали бы реально существующие ограничения мощности усилительных и исполнительных элементов; т. е. качественное управление конкретными ДО (подсистемами) должно обеспечиваться не благодаря большой мощности управляющих сигналов (это имеет место в большинстве известных СУ, синтезированных традиционными методами), а благодаря правильному формированию и своевременной подаче соответствующих управляющих воздействий. Эти воздействия должны формироваться с помощью маломощных корректирующих устройств, максимально учитывающих свойства соответствующих ДО и параметры их движения. Обобщенная схема предлагаемой многоуровневой СУ по одной степени свободы АПР показана на рис. 1.

Для реализации предложенного подхода синтез обобщенной (многоуровневой) системы управления АПР осуществляется поэтапным решением следующих подзадач.

На первом этапе выполняется синтез самонастраивающихся подсистем нижнего уровня (внутреннего контура) для управления движительным комплексом АПР. Эти подсистемы обеспечивают каждому движителю постоянные желаемые динамические свойства при любых изменениях его па-

раметров в процессе произвольного движения робота.

На втором этапе разрабатывается единая адаптивная подсистема централизованного управления скоростью движения АПР (на основе централизованной модели (1), (2)) или отдельные адаптивные регуляторы для всех локальных систем децентрализованного управления скоростью его движения по каждой СС (на основе децентрализованных моделей (3)). На этом этапе (см. средний контур на рис. 1) предполагается не только гарантировать независимость динамических свойств контура скорости от переменных параметров АПР и параметров его взаимодействия с окружающей вязкой средой, но и обеспечить достижение максимальных показателей по быстродействию и точности управления.

И, наконец, на третьем этапе с учетом спроектированного среднего контура управления скоростью движения АПР синтезируется СУ его пространственным движением одновременно по всем шести СС. При этом создаваемый внешний контур управления с помощью ранее синтезированных внутренних контуров придает АПР в целом желаемые динамические свойства и позволяет добиваться высоких показателей качества (в том числе динамической точности) при обработке произвольных пространственных траекторий с высокой скоростью движения с учетом всех реально существующих взаимовлияний между СС, а также переменных и трудно идентифицируемых воздействий со стороны окружающей вязкой среды.

В рамках одной статьи нет возможности даже упомянуть все особенности и алгоритмы работы всех разрабатываемых оригинальных методов многоэтапного (многоуровневого) синтеза высококачественных самонастраивающихся, адаптивных и робастных систем управления АПР на основе рассмотренных ранее подходов. Поэтому отметим лишь основные особенности этих методов и рассмотрим получаемые с их помощью результаты.

3. СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯМИ АУТОНОМНЫХ АПР

Отметим, что система уравнений (4), описывающая динамику каждого движителя, весьма сложная, существенно нелинейная и нестационарная. Поэтому задачу синтеза адаптивной СУ движительным комплексом АПР с целью формирования ограниченных по мощности сигналов управления следует решать в два этапа [6–8]. Вначале синтезируется специальный нелинейный регулятор, предназначенный для компенсации нелинейностей при некоторых фиксированных значениях переменных параметров J_d и F_m . Затем на основе

эталонной модели формируется дополнительный контур самонастройки, позволяющий исключить отрицательное влияние отклонений параметров движителей от номиналов на качество процесса управления. На основе указанного двухэтапного метода синтеза формируется адаптивная СУ, позволяющая нелинейному движителю с существенно переменными параметрами (см. выражение (4)) придать свойства простого линейного периодического звена с постоянными желаемыми параметрами вида:

$$\dot{\tau}_d = (K_d \tau_d - \tau_d) / T_d, \quad (5)$$

где K_d и T_d — желаемые коэффициент усиления и постоянная времени.

Структурная схема адаптивной СУ каждым движителем АПР, реализующей синтезированный закон управления, представлена на рис. 2 [9–12]. Исследования этой СУ подтвердили ее высокую работоспособность и эффективность при различных движениях АПР.

Очевидно, что описание вида (5), в соответствие с которым приводится движитель АПР с помощью первого (внутреннего) контура управления (см. рис. 1), гораздо проще описания (4). Поэтому именно описание (5) на втором этапе синтеза (это будет показано далее) позволяет получить относительно простое и качественное управление скоростью движения АПР.

Таким образом, на первом этапе синтеза удалось разработать такую СУ, которая позволяет придать каждому движителю АПР, реально имеющему сложное описание вида (4), динамические свойства простейшего звена с постоянными параметрами вида (5). После решения этой задачи можно приступить ко второму этапу — синтезу подсистемы управления скоростью движения АПР (см. средний контур на рис. 1).

4. СИНТЕЗ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ АПР НА ОСНОВЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим различные методы синтеза СУ скоростью движения АПР на основе локальных децентрализованных систем (2), соответствующих всем шести степеням свободы АПР.

Методы синтеза системы децентрализованного управления скоростью движения по каждой степени свободы АПР будут разрабатываться с учетом того, что после введения внутренних контуров управления движителями они описываются уравнениями вида (5) с постоянными параметрами. При этом полная СУ скоростью движения АПР представляется в виде совокупности локальных подсистем управления по каждой отдельной СС (без

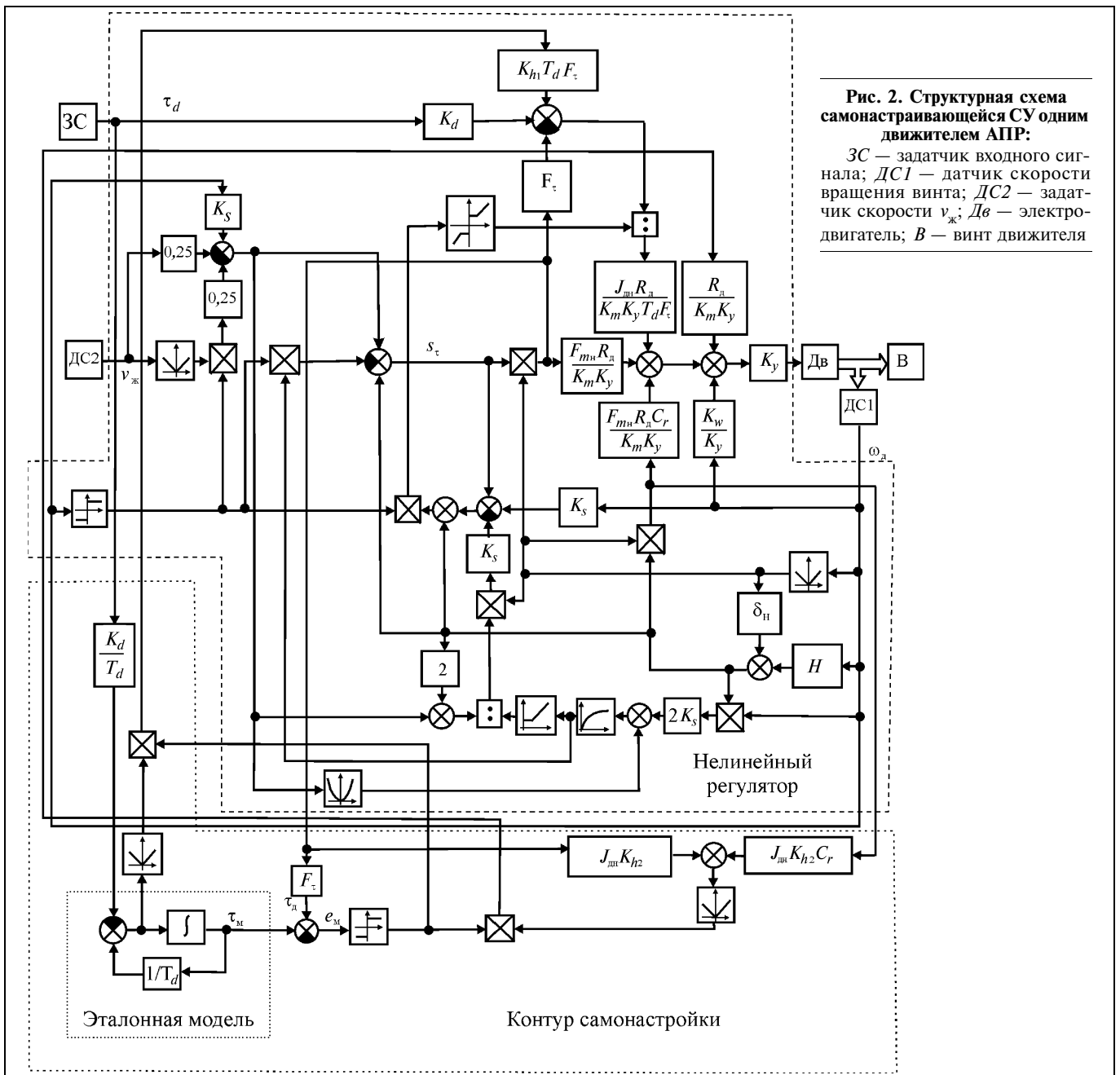


Рис. 2. Структурная схема самонастраивающейся СУ одним двигателем АПР:

ЗС — задатчик входного сигнала; *ДС1* — датчик скорости вращения винта; *ДС2* — задатчик скорости $v_{ж}$; *Дв* — электродвигатель; *В* — винт двигателя

какого-либо упрощения или пренебрежения реально существующими силами и моментами, действующими на АПР в процессе его перемещения в вязкой среде). Как показали результаты исследований, для разработки методов синтеза регуляторов для локальных подсистем управления скоростями движения АПР по каждой СС можно использовать обобщенные подходы построения систем с переменной структурой (СПС), работающих в скользящем режиме, и систем с эталонными моделями, настраиваемыми в соответствии с методом Ляпунова. Вначале рассмотрим методы синтеза СПС.

Отметим, что в отличие от известных методов вновь созданные методы позволяют синтезировать не только робастные, но и адаптивные системы, обладающие повышенной скоростью обнуления ошибок управления в пределах заданной мощности исполнительных элементов. При этом для синтеза регуляторов в качестве исходной математической модели объекта управления в каждом контуре управления скоростью движения АПР используются уравнения вида (3) и (5). Подчеркнем, что в дальнейшем при исследовании полного пространственного движения АПР по сложным траекториям все подсистемы, синтезированные для каждой от-

дельной СС, будут объединены в одну глобальную СУ, которая в итоге и будет обеспечивать заданную динамическую точность управления роботом.

Для повышения быстродействия синтезируемых СПС был применен подход, согласно которому на основе косвенной оценки удалось непрерывно подстраивать расположение зоны высокочастотных переключений структуры регуляторов без непосредственного измерения трудно идентифицируемых и непрерывно изменяющихся параметров АПР [13—18]. Был разработан новый закон изменения структуры, позволяющий сохранять самонастройку режима высокочастотных переключений и для вынужденного движения объекта управления с учетом влияния окружающей вязкой среды [19, 20], а также были определены параметры зоны этих переключений и доказаны условия возникновения, существования и устойчивости режима переключений при любом значении входного сигнала и изменяющихся параметрах АПР. Указанный закон гарантирует качественную работу самонастраивающейся СУ только в том случае, когда на ее вход поступает ступенчато изменяющийся сигнал. На сам же деле в процессе движения АПР этот сигнал изменяется произвольно и непрерывно. Поэтому в работе [21] был предложен метод и получено аналитическое выражение для расчета размера шага квантования непрерывного входного сигнала, которые, с одной стороны, сохраняют синтезированный алгоритм самонастройки регулятора, а с другой — обеспечивают достаточно высокую точность аппроксимации непрерывного входного сигнала. Для реализации указанной аппроксимации было разработано специальное устройство, преобразующее непрерывные функции в последовательность ступенчатых сигналов с настраиваемым шагом квантования. В результате применения разработанных самонастраивающихся регуляторов динамика всех локальных подсистем управления скоростями движения АПР при их работе в режиме высокочастотных переключений в задаваемой малой зоне этих переключений уже может быть описана линейным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{v} + Cv = Cv_d, \quad (6)$$

где C — переменный положительный коэффициент. В результате свойства этих подсистем становятся зависимыми только от значений коэффициента C и практически не зависят от переменных параметров АПР. Уравнение (6) на следующем этапе проектирования обобщенной (иерархической) СУ будет использоваться в качестве описания динамического объекта для синтезируемой подсистемы управления пространственным движением АПР.

Как показали результаты математического моделирования, при различных законах изменения скоростей движения АПР системы управления, синтезированные на основе предложенного подхода, обеспечивают непрерывную и высококачественную самонастройку параметров зоны высокочастотных переключений и тем самым гарантируют высокую скорость обнуления ошибки (высокую динамическую точность) управления скоростью движения АПР при любых его параметрах и любой форме задающего сигнала скорости. Законы изменения ошибки при отработке ступенчатых входных сигналов скорости по одной из степеней свободы АПР при различных значениях его параметров приведены на рис. 3. Кривые 1 и 3 соответствуют наименее нагруженному, а кривые 2 и 4 — наиболее нагруженному режиму движения АПР. Видно, что для типовых СПС (кривые 3 и 4) независимо от параметров АПР время переходного процесса системы остается практически постоянным (даже в тех случаях, когда параметры АПР допускают увеличение быстродействия). Самонастраивающиеся СПС позволяют почти в полтора раза увеличить быстродействие системы в благоприятных режимах работы робота (см. кривую 1).

Высокоточные адаптивные локальные подсистемы управления скоростями движения по отдельным степеням свободы АПР можно синтезировать и на основе метода, в соответствии с которым предусматривается применение эталонных моделей и сигнальной самонастройки [22]. В системах управления, синтезированных на основе этого метода, обеспечивается компенсация динамического взаимовлияния движений по всем степеням свободы АПР, а также воздействий внешней среды.

Синтез адаптивных регуляторов по данному методу выполняется также в два этапа. На первом этапе благодаря нелинейной коррекции нелинейному объекту придаются желаемые динамические свойства простого линейного звена с постоянными

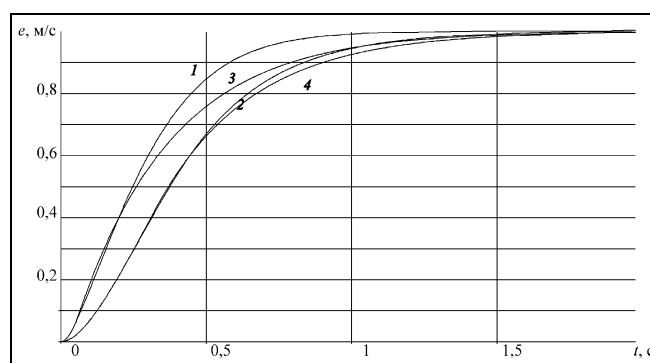


Рис. 3. Ошибка по скорости движения АПР при отработке ступенчатого сигнала:

1 и 2 — случай синтезированной самонастраивающейся СПС; 3 и 4 — случай традиционной СПС

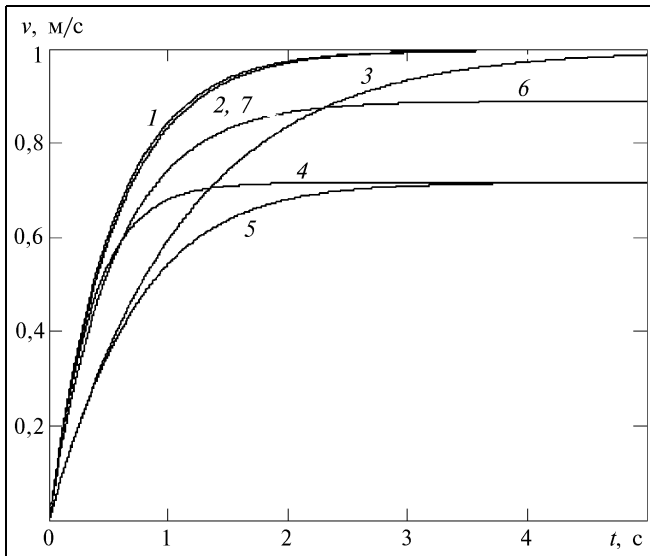


Рис. 4. Переходные процессы в адаптивной локальной подсистеме управления скоростью движения по одной линейной степени свободы АПР:

1 — желаемый процесс изменения скорости АПР; 2—6 — процессы в системе с нелинейной коррекцией без самонастройки при различных значениях параметров АПР; 7 — процесс в системе с самонастройкой по эталонной модели при любых параметрах АПР из заданного диапазона

ми параметрами. На втором этапе с помощью адаптивной сигнальной самонастройки по эталонной модели осуществляется компенсация вариаций всех параметров и внешних воздействий. Преимущество такого подхода, наряду с упрощением процедуры синтеза, состоит в значительном уменьшении амплитуды разрывной составляющей сигнала управления по сравнению с системой без предварительной нелинейной коррекции, поскольку в данном случае происходит настройка лишь по отклонениям параметров, а не по их абсолютным значениям. При этом исключается возможность входа усилительных и исполнительных элементов АПР в зону насыщения.

В результате применение указанных двухуровневых адаптивных СУ с эталонными моделями позволяет каждый внутренний контур скорости движения АПР (так же, как и в системах с адаптивными СПС) с достаточной степенью точности представить в виде апериодического звена первого порядка с постоянными желаемыми параметрами [23].

На рис. 4 показаны переходные процессы в локальной адаптивной подсистеме управления скоростью движения по одной линейной степени свободы АПР. Видно, что двухуровневая адаптивная СУ обеспечивает точное придание существенно нелинейному ДО желаемых свойств линейной эталонной модели (см. кривые 1 и 7).

Однако, когда взаимовлияние между степенями свободы АПР очень велико, децентрализованные

СУ, построенные с помощью метода декомпозиции, могут оказаться недостаточно точными. В этом случае следует применять многоканальные централизованные СУ скоростью движения АПР, способные обеспечить требуемую точность управления в указанных условиях. При этом следует воспользоваться наиболее общей моделью АПР вида (1).

5. СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ АПР НА ОСНОВЕ ИХ ПОЛНЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрим два метода синтеза, предполагающие применение СПС и эталонных моделей. Вначале решим задачу синтеза подсистемы управления скоростью движения АПР на основе разрывных сигналов управления и полной динамической модели (1). При этом в каждом канале управления АПР реализуем скользящий режим, обеспечивающий инвариантность синтезируемой подсистемы к изменениям параметров АПР, обусловленным взаимовлияниями между всеми шестью каналами управления, а также к внешним воздействиям со стороны окружающей вязкой среды. В процессе синтеза также будем полагать, что движительный комплекс после введения соответствующей коррекции (о ней говорилось выше) будет описываться дифференциальным уравнением с постоянными параметрами вида (5).

Существование согласованных скользящих режимов по каждой из шести степеней свободы АПР при любых текущих значениях их параметров и наличии взаимовлияний между этими СС обеспечивается путем надлежащего выбора и подстройки параметров переключающих устройств. При этом в условиях ограниченной мощности двигателей локальных подсистем управления АПР не допускается запаздывания режима скольжения в каком-либо канале управления, которое приводит к сходу АПР с программной траектории движения. Законы определения параметров переключающих устройств и синтезированная централизованная подсистема управления скоростью движения робота детально описаны в работах [24—26].

Переходные процессы в режимах скольжения при отработке ступенчатых воздействий во всех шести каналах синтезированной централизованной СПС показаны на рис. 5. Видно, что применение централизованной многоканальной СПС, учитывающей полное взаимовлияние между всеми степенями свободы АПР в процессе его движения, позволяет гарантировать монотонный характер переходных процессов и высокое быстродействие во всех каналах управления при любых (в заданном диапазоне робота) параметрах, а также полную динамическую “развязку” этих каналов.

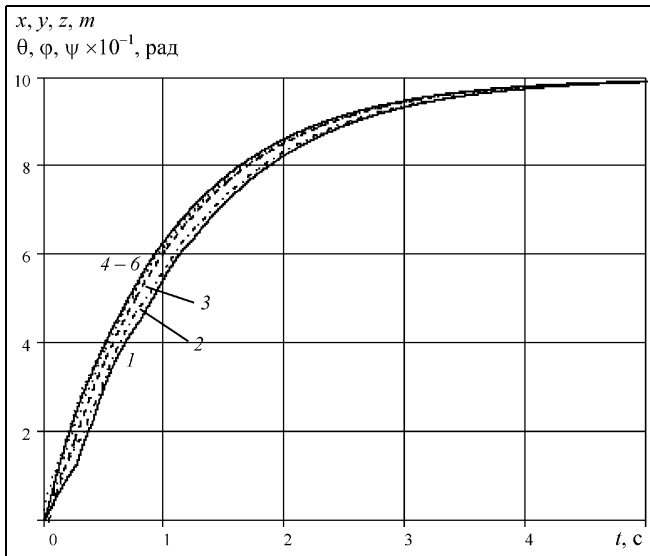


Рис. 5. Переходные процессы во всех каналах синтезированной централизованной СПС

Высокая точность работы среднего контура управления скоростью движения АПР, когда любые отклонения его параметров от номинальных значений не превышают 100 %, может быть получена и с помощью централизованной СУ, построенной с использованием сигнальной самонастройки и шестимерной эталонной модели [27–29]. При разработке метода синтеза этой многомерной СУ предполагается, что инерционность скорректированных (на основе рассмотренных выше методов) движителей по сравнению с инерционностью корпуса самого АПР пренебрежимо мала. Это допущение справедливо во многих случаях.

При синтезе централизованной подсистемы управления скоростью движения АПР требуется сформировать такой закон \mathbf{u}_v управления всеми его каналами ($\mathbf{u}_v = \mathbf{u}_v(t) \in R^6$ — вектор сигналов, вырабатываемых самонастраивающимся регулятором контура скорости), чтобы по завершении процесса самонастройки поведение многомерного нелинейного нестационарного объекта, описываемого матричным уравнением (1), при любых значениях его параметров и возмущающих воздействиях (из заданных диапазонов) определялось желаемым линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами вида

$$\dot{\mathbf{v}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{v}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{v}_d, \quad (7)$$

где $\mathbf{A}_M \in R^{6 \times 6}$ — отрицательно определенная постоянная матрица, $\mathbf{B}_M \in R^{6 \times 6}$ — постоянная матрица задающих сигналов, $\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_d(t) \in R^6$ — вектор задающих сигналов по скорости движения АПР.

Для этого должно выполняться предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_v(t)\| = 0,$$

где $\mathbf{e}_v(t) = \mathbf{v} - \mathbf{v}_M \in R^6$ — вектор ошибки по скорости движения АПР относительно модели, $\mathbf{v}_M = \mathbf{v}_M(t) \in R^6$ — вектор желаемого значения скорости движения АПР.

Обобщенная структурная схема самонастраивающейся СУ с синтезированным законом управления вектором скорости движения АПР [27, 29] изображена на рис. 6. Здесь матрицы условно представлены в виде единых блоков, а векторы — в виде одного сигнала. Как показали результаты математического моделирования, СУ с сигнальной самонастройкой по эталонной модели, синтезированные с помощью разработанного метода, позволяют приблизить динамические свойства АПР, описываемых сложными нелинейными и нестационарными дифференциальными уравнениями (1), к динамическим свойствам модели, описываемой линейным дифференциальным уравнением с желаемыми постоянными коэффициентами (7).

На рис. 7 показаны переходные процессы во всех шести каналах управления АПР при обработке ступенчатых входных воздействий. Здесь кривые 1–6 соответствуют изменениям компонент вектора \mathbf{v} в типовой системе без самонастройки при “наихудших” комбинациях параметров АПР и внешних воздействий. Как показывает анализ ра-

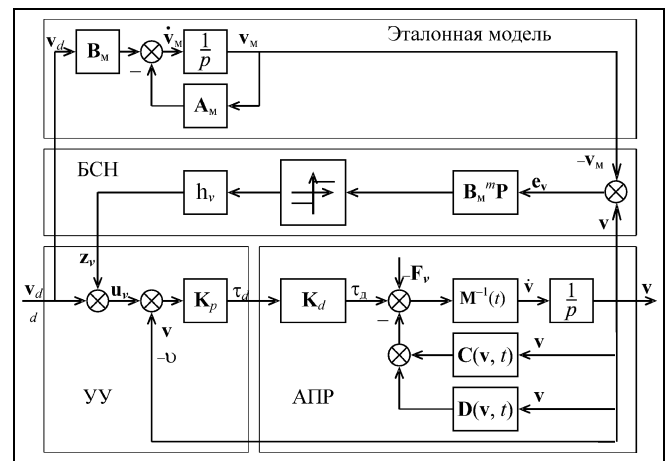


Рис. 6. Структурная схема многомерной самонастраивающейся СУ с эталонной моделью:

БСН — блок самонастройки; УУ — линейное устройство управления; $\mathbf{z}_v = \mathbf{z}_v(t) \in R^6$ — вектор дополнительных сигналов самонастройки; $\mathbf{h}_v, \mathbf{K}_d, \mathbf{K}_p \in R^{6 \times 6}$ — диагональные матрицы постоянных коэффициентов усиления, коэффициентов движительного комплекса и коэффициентов линейного регулятора скорости, соответственно; $\mathbf{P} \in R^{6 \times 6}$ — симметрическая и положительно определенная матрица коэффициентов усиления

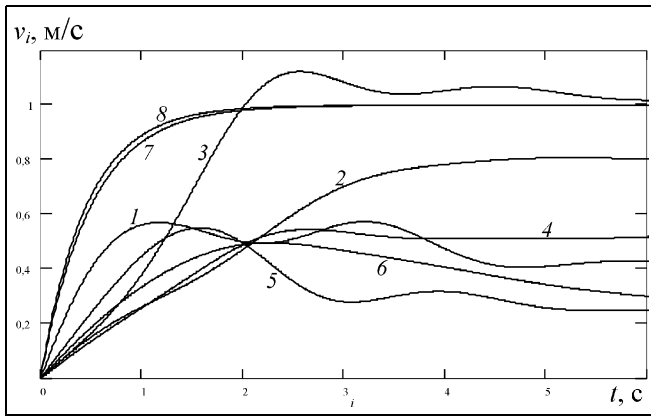


Рис. 7. Переходные процессы в системе управления скоростью движения АПР при ступенчатых входных воздействиях:
 1–6 — в типовой системе; 7 — в эталонной модели; 8 — при введении самонастройки по эталонной модели

боты такой СУ, при наличии взаимовлияния между всеми степенями свободы АПР и внешнего возмущения она далека от эталонной модели (7) (см. кривую 7). В этой СУ имеют место даже статические ошибки и почти втрое по сравнению с эталонной моделью увеличивается время переходного процесса. При введении самонастройки по эталонной модели достигается практически полное совпадение переходных процессов во всех каналах управления (кривая 8) с желаемым процессом (кривая 7) при любых значениях параметров АПР и при $F_v \neq 0$.

Синтезируемые централизованные СУ гораздо сложнее децентрализованных сепаратных систем. Поэтому их целесообразно применять только для управления АПР с сильными взаимовлияниями между СС, предназначенными для быстрых перемещений по сложным пространственным траекториям.

Таким образом, различные СУ скоростями движения АПР, синтезированные на основе предложенных методов, позволяют придать контурам управления желаемые динамические свойства, описываемые линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

6. СИНТЕЗ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ И ОРИЕНТАЦИЕЙ АПР

Согласно определенному ранее порядку синтеза глобальной системы управления АПР на данном этапе будет разработан внешний контур СУ его пространственным перемещением. Эта система должна придать роботу желаемые динамические свойства и обеспечить высокую результирующую динамическую точность при его движении по произвольным траекториям. В качестве объекта управления здесь рассматривается уже синтезиро-

ванный на предыдущих этапах контур управления скоростью движения АПР. Поведение контура скорости в целом (с учетом применения в каждой подсистеме разработанных выше управляющих устройств с переменной структурой или с эталонной моделью) может быть описано следующим матричным дифференциальным уравнением

$$\dot{v} = \dot{v}_d + K_v(v_d - v), \tag{8}$$

где $K_v \in R^{6 \times 6}$ — диагональная матрица постоянных коэффициентов.

С помощью метода, подробно описанного в работах [30, 31] и с учетом выражения (8) был получен закон формирования выходного сигнала внешнего контура управления в виде

$$\dot{v}_d = -K_v v_d + J^{-1}(K_{p3}x_d - K_{p2}x - (J + K_{p1}J - JK_v)v), \tag{9}$$

где $K_{p1}, K_{p2}, K_{p3} \in R^{6 \times 6}$ — диагональные матрицы коэффициентов, надлежащий выбор которых позволяет обеспечить заданное качество управления АПР.

Очевидно, что для реализации закона управления (9) необходимо постоянно вычислять элементы матриц J^{-1} и J , являющиеся сложными тригонометрическими выражениями (функциями), непрерывно изменяющимися в зависимости от текущих значений угловых координат АПР. Для исключения трудоемких вычислений элементов этих матриц были выведены аналитические зависимости, которые затем использовались при реализации синтезированной СУ пространственным движением робота.

Структурная схема этой СУ представлена на рис. 8. Ее исследование (с учетом синтезированных подсистем внутренних контуров) при движении АПР по сложной пространственной траектории с одновременным изменением линейных и угловых координат проводилось на основе полной математической модели (1), (2), учитывающей все взаимовлияния между всеми СС и внешние воз-

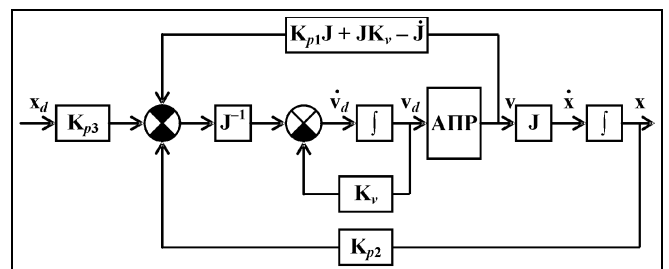
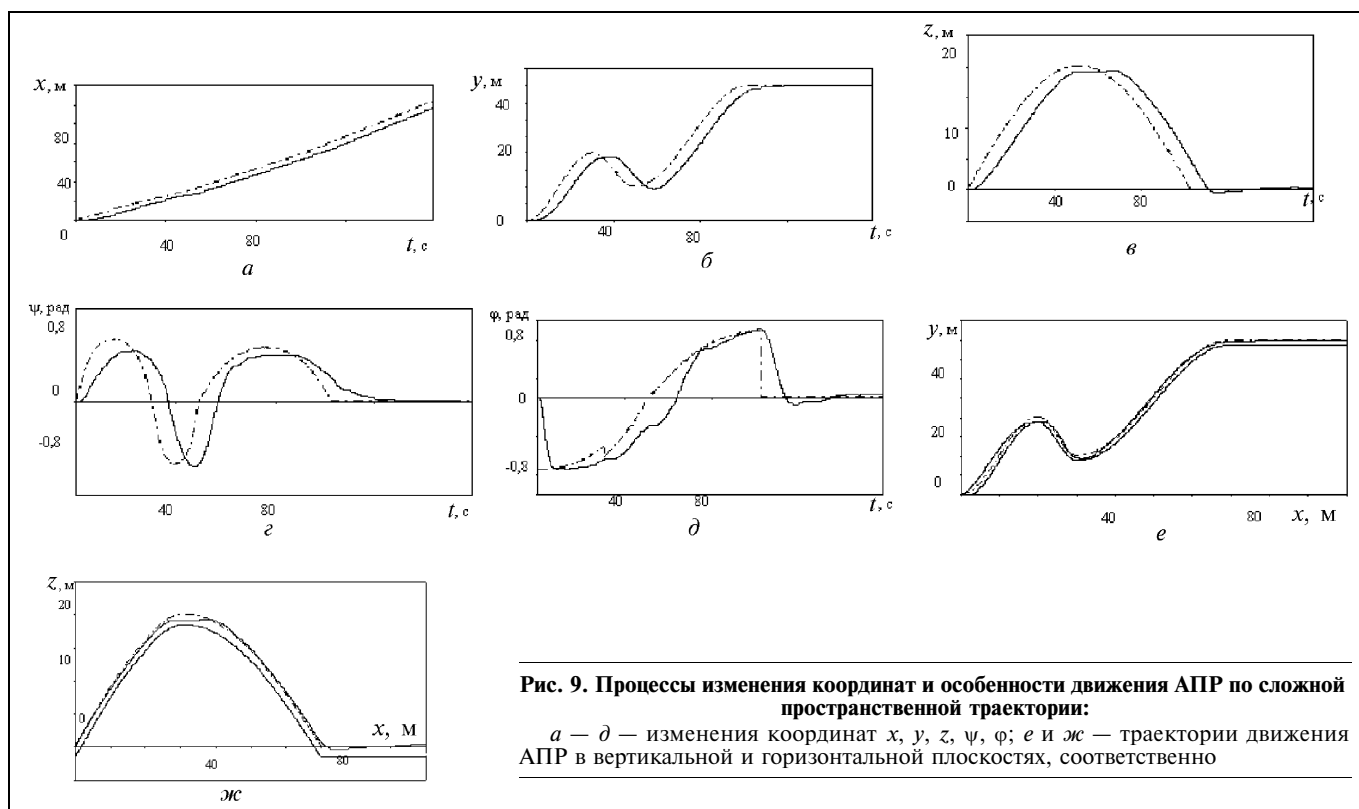


Рис. 8. Структурная схема СУ положением и ориентацией АПР в пространстве



действия. Результаты этого исследования представлены на рис. 9. Здесь сплошной линией показаны движения АПР, а штриховой — программные значения соответствующих координат. На графиках *e* и *ж* самая нижняя сплошная линия соответствует профилю поверхности, огибаемой АПР в соответствующей плоскости.

Результаты исследований показали, что даже при большой скорости движения АПР по сложной траектории (до 1,5 м/с), когда сильны эффекты взаимовлияния между его СС, синтезированная многоконтурная СУ обеспечивает высокую динамическую точность управления. Робот отслеживает траекторию с некоторым запаздыванием (см. рис. 9, *б*, *в*, *г* и *д*), но его максимальные отклонения от этой траектории не превышают 0,6 м.

Таким образом, синтезированная многоконтурная СУ пространственным движением АПР позволяет обеспечить высокое качество как в режиме терминального управления, так и в режиме его движения с большими скоростями по сложным траекториям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье укрупненно рассмотрены основные особенности проектирования высококачественных СУ пространственным перемещением АПР, описываемых дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Это про-

ектирование может осуществляться на основе различных подходов, методов и алгоритмов. Однако основным свойством синтезируемых СУ остается неизменно высокая динамическая точность управления роботами в условиях значительных и часто непредсказуемых изменений их параметров и воздействий со стороны окружающей вязкой среды в процессе быстрых движений по сложным пространственным траекториям. Результаты выполненных исследований полностью подтвердили указанные свойства всех синтезированных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантов Е. Н., Махин Н. Н., Шереметов Б. Б. Основы теории движения подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1973. — 216 с.
2. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами. — М.: Круглый год, 2001. — 288 с.
3. Лукомский Ю. А., Чугунов В. С. Системы управления морскими подвижными объектами. — Л.: Судостроение, 1988. — 271 с.
4. Пятницкий Е. С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции // Автоматика и телемеханика. — 1989. — № 1. — С. 87—98; № 2. — С. 57—71.
5. Агеев М. Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА // Подводные роботы и их системы. — Владивосток, 1995. — С. 33—49.
6. Филаретов В. Ф. Синтез самонастраивающихся систем управления электроприводами манипуляционных механиз-



- мов // Изв. вузов. Приборостроение. — 1989. — № 12. — С. 24—28.
7. *Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А.* Синтез и исследование самонастраивающейся системы управления движителями подводного аппарата // Изв. вузов. Электромеханика. — 2000. — № 4. — С. 60—64.
 8. *Filaretov V. F., Lebedev A. V., Dyda A. A.* The Underwater Robot Thruster Control System with Non-Linear Correction and Reference Model Self-Adjustment // CD-ROM Proc. of the European Control Conf. — Karlsruhe, Germany, 1999. — F-0098. — P. 1—4.
 9. *Пат. 2147001 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, А. А. Дыда // Бюл. — 2000. — № 9.
 10. *Пат. 2147985 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец // Там же. — № 12.
 11. *Пат. 2191106 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев // Там же. — 2002. — № 29.
 12. *Пат. 2209718 РФ.* Устройство для управления движителем подводного робота / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец, А. В. Лебедев // Там же. — 2003. — № 22.
 13. *Дыда А. А., Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.* Синтез системы с переменной структурой для управления движением подводного робота // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2000. — № 1. — С. 155—162.
 14. *Пат. 2215318 РФ.* Устройство для управления подводным роботом / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец // Бюл. — 2003. — № 30.
 15. *Dyda A. A., Filaretov V. F.* Algorithm of Time-Sub-Optimal Control for Robots Manipulator Drives // Proc. of the 12-th World IFAC Congress. — Sydney, Australia, 1993. — P. 314—319.
 16. *Filaretov V. F., Lebedev A. V., Dyda A. A.* The Sliding Mode Adaptive Control System for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 7-th Int. Conf. on Advanced Robotics. — Sant Feliu de Guixols, Catalonia, Spain, 1995. — Vol. 1. — P. 263—266.
 17. *Filaretov V. F., Lebedev A. V.* The Variable Structure System Synthesis for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 4-th ECPD Int. Conf. on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems. — Moscow, Russia, 1998. — P. 417—421.
 18. *Lebedev A. V., Filaretov V. F.* The Analysis of Variable Structure System with the Non-Ideal Switching Device // Proc. of the second IASTED Intern. Conf. on Automation, Control and Applications. — Novosibirsk, Russia, 2005. — P. 420—424.
 19. *Filaretov V. F., Ukhimits D. A.* Synthesis of Underwater Robots Adaptive Velocity Control System // Proc. of the 8-th IFAC Symp. on Computer Aided Control System Design. — Selford, UK, 2000. — P. 502—506.
 20. *Filaretov V. F., Ukhimits D. A.* Adaptive Control System with Variable Structure for Underwater Robot // Proc. of the 12th DAAAM Symp. on Intelligent Automation and Manufacturing. — Jena, Germany, 2001. — P. 141—144.
 21. *Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.* Выбор величины шага квантования непрерывного задающего сигнала в самонастраивающейся системе с переменной структурой второго порядка // Сб. трудов ДВО РАН. — Владивосток, 2002. — Вып. 6. — С. 28—44.
 22. *Филаретов В. Ф., Лебедев А. В.* Децентрализованное адаптивное управление скоростью движения подводного робота // Мехатроника. — 2000. — № 6. — С. 35—39.
 23. *Пат. 2230654 РФ.* Устройство для управления подводным роботом / А. В. Лебедев, В. Ф. Филаретов // Бюл. — 2004. — № 17.
 24. *Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.* Синтез многоканальной системы с переменной структурой для управления пространственным движением подводного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2005. — № 3. — С. 18—26.
 25. *Filaretov V. F., Lebedev A. V.* The Synthesis of Multivariate System with Variable Structure and Nonlinear Correction for Control of the Underwater Vehicle Movement // Proc. of the Sixth Intern. Scientific Forum AIMS for Future of Engineering Science. — Hong Kong, China, 2005. — P. 118—123.
 26. *Lebedev A. V., Filaretov V. F.* The Synthesis of Multi — Dimensional Adaptive Variable Structure System for Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the Sixth ISOPE PACOMS. — Vladivostok, 2004. — P. 236—240.
 27. *Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.* Синтез самонастраивающейся системы с эталонной моделью для управления скоростью пространственного движения подводного аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2002. — № 2. — С. 170—176.
 28. *Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Стаценко О. М.* Многоканальная самонастраивающаяся система централизованного управления движением подводного робота // Мехатроника. — 2001. — № 9. — С. 41—45.
 29. *Lebedev A. V., Filaretov V. F.* The Synthesis of Adaptive Control System with Reference Model for Autonomous Underwater Vehicle // Proc. of IMECE 2002. ASME Int. Mechanical Engineering Congress. — New Orleans, USA, 2002. — Vol. 2. — P. 15—19.
 30. *Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А.* Синтез адаптивной системы управления пространственным положением подводного робота // Мехатроника. — 2001. — № 1. — С. 21—25.
 31. *Filaretov V. F., Lebedev A. V., Ukhimits D. A.* The Development of Adaptive Control Systems of Underwater Vehicle's Spatial Motion // Proc. the Fifth Int. Scientific Forum AIMS for Future of Engineering Science. — Paris, France, 2004. — P. 211—216.

☎ (4232) 32-06-82

E-mail: filaret@iacp.dvo.ru



Новая книга

Филаретов В. Ф., Лебедев А. В., Юхимец Д. А. Устройства и системы управления подводных роботов / Ин-т автоматики и процессов управления ДВО РАН; отв. ред. Ю. Н. Кульчин. — М.: Наука, 2005. — 270 с.

Рассмотрены системы и устройства управления подводными роботами, предназначенные для обеспечения высокой динамической точности при их скоростном перемещении по сложным пространственным траекториям в условиях неопределенности и существенной переменности параметров. Исследуются и оцениваются различные подходы и методы, обеспечивающие инвариантность показателей качества управления к изменениям параметров объектов управления и воздействиям внешней среды.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области управления сложными многосвязными нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ БИЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ¹

А. Н. Жирабок, А. А. Летенко

Для решения задачи диагностирования динамических систем, описываемых билинейными моделями, предложено применять логико-динамический подход, предполагающий следующую последовательность действий: преобразование билинейной составляющей к соответствующему виду; удаление преобразованной билинейной составляющей; построение наблюдателя для полученной линейной модели с некоторым дополнительным ограничением; преобразование полученного линейного наблюдателя в билинейного.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из действенных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем является применение методов диагностирования, позволяющих проверять правильность функционирования системы в процессе выполнения ею своих функций на рабочих управляющих сигналах. Разработано значительное число различных методов решения диагностических задач, объединенных концепцией аналитической избыточности [1], согласно которой диагностирование осуществляется на основе проверки аналитических зависимостей, которые существуют между измеряемыми на определенном интервале времени управляющими и выходными сигналами диагностируемой системы.

В настоящей работе решается задача диагностирования систем, описываемых билинейной моделью вида

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t) F^i x(t) + \\ &+ Lf(t) + E\rho(t), \\ y(t) &= Hx(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $x \in X \subset R^n$, $y \in Y \subset R^l$, $u \in U \subset R^m$ — векторы состояния, измеряемого выхода и управления, соответственно; u_i — i -я компонента вектора u ; F^0 , G , F^i , $i = 1, 2, \dots, m$, H , L и E — известные постоянные матрицы соответствующих размеров. Слагаемое $Lf(t)$ описывает влияние дефектов на диагностируемую систему; предполагается, что если дефекты отсутствуют, то $f(t) = 0$, при появлении дефекта $f(t)$

становится неизвестной функцией времени. Слагаемое $E\rho(t)$ описывает вклад дестабилизирующих факторов, под которыми будем понимать погрешности моделирования и неконтролируемые внешние воздействия на диагностируемую систему. Векторная функция $\rho(t)$ считается неизвестной, матрица E указывает на то, каким образом дестабилизирующие факторы действуют на систему.

Билинейные модели занимают промежуточное положение между линейными и нелинейными. Достоинство их состоит в том, что они используют матричное описание и, следовательно, задачи анализа и синтеза таких систем, в частности, задачи диагностирования, могут быть решены на основе хорошо разработанных методов линейной алгебры. В то же время, билинейными моделями описывается множество разнообразных технических систем и процессов, например, системы управления ядерными реакторами, гидравлические управляющие системы, системы сжигания газа в промышленных печах, процессы нагрева и др.

Требуется построить диагностический наблюдатель, чувствительный к дефектам и нечувствительный к дестабилизирующим факторам. Эта задача рассматривалась в работах [2, 3], где был развит подход на основе так называемых наблюдателей с неизвестным входом, первоначально разработанный для линейных систем [4]. Его особенность состоит в том, что при построении наблюдателя задается матрица F_*^0 , описывающая его динамику, остальные матрицы зависят от нее и должны заново рассчитываться при изменении этой матрицы, когда, например, требуется изменить показатели устойчивости системы.

В настоящей работе предлагается другой подход, не требующий таких перерасчетов. Он основан на так называемом логико-динамическом под-

¹ Работа поддержана грантом РФФИ.



ходе, предложенном в работах [5, 6]. Объясним его на примере системы, представленной моделью вида

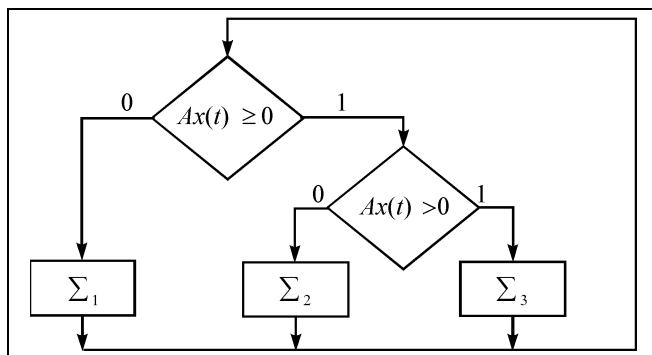
$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + G'u(t)\text{sign}(Ax(t)) + Gu(t), \quad (2)$$

$$y(t) = Hx(t)$$

где G' — матрица, A — матрица-строка. Суть этого подхода состоит в том, что исходная нелинейная система преобразуется в некоторую логико-динамическую систему, которая представляет собой совокупность линейных подсистем и логических условий. На рисунке представлена структура логико-динамической системы для модели (2), где подсистема Σ_1 имеет линейное описание с матрицами F^0 , H и $G - G'$, подсистема Σ_2 — с матрицами F^0 , H и G , подсистема Σ_3 — с матрицами F^0 , H и $G + G'$. Важно, что матрицы F^0 и H у этих подсистем одинаковы, поскольку именно они используются при синтезе наблюдателя. После такого преобразования решается задача диагностирования для линейной системы с матрицами F^0 и H и дополнительным (по отношению к традиционной задаче диагностирования линейных систем) ограничением линейного характера и строится линейный логико-динамический наблюдатель, который затем преобразуется в нелинейный. Более детально этот подход будет описан далее.

В работе [5] показано, что логико-динамический подход может быть применен к другим типам нелинейности, когда в модели (2) вместо функции sign используются функции \sin , \cos , \ln и др. Для этого соответствующая нелинейность вносится в наблюдатель вместо функции sign . В этом случае дополнительное ограничение при построении наблюдателя отражает уже не совокупность логических условий объекта диагностирования и наблюдателя, а соответствие их нелинейных частей. Кроме того, таких нелинейностей может быть несколько, и тогда матрица A будет содержать несколько строк.

В рассматриваемом билинейном случае нелинейная составляющая отсутствует, матрица A со-



Логико-динамическая структура нелинейной системы (2)

ставляется из строк всех матриц F^i , матрица G' выделяет нужную компоненту вектора управления u . Фактически в процедуре решения задачи диагностирования билинейных систем последняя матрица не участвует, поскольку необходимые компоненты вектора u определяются индексами используемых матриц F^i .

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Предлагаемый метод решения задачи диагностирования для системы, описываемой моделью (1), включает в себя следующие шаги.

1. Преобразование билинейной составляющей к виду, допускающему возможность применения логико-динамического подхода.

2. Удаление преобразованной билинейной составляющей.

3. Построение наблюдателя для полученной линейной модели с некоторым дополнительным ограничением, имеющим также линейный характер.

4. Преобразование полученного линейного наблюдателя в билинейный.

На первом шаге динамическая часть модели (1) преобразуется к виду

$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t) \sum_{j=1}^m C^j F^{ij} x(t) + Lf(t) + E\rho(t),$$

где F^{ij} — j -я строка матрицы F^i , $G^1 = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$, $G^2 = [0 \ 1 \ \dots \ 0]^T$, $G^n = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$.

После удаления билинейной составляющей получается линейная модель:

$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + Gu(t) + Lf(t) + E\rho(t),$$

$$y(t) = Hx(t).$$

Третий шаг в соответствии с логико-динамическим подходом заключается в синтезе линейного наблюдателя. Из линейной теории диагностирования известно [4—6], что в этой процедуре главную роль играет матрица Φ , которая в случае отсутствия дефектов связывает состояние исходной линейной системы и наблюдателя:

$$x_*(t) = \Phi x(t).$$

Здесь x_* — вектор состояния наблюдателя, описываемого уравнениями

$$\dot{x}_*(t) = F_*^0 x_*(t) + G_* u(t) + Jy(t), \quad (3)$$

$$y_*(t) = H_* x_*(t),$$

y_* — выходной сигнал наблюдателя, F_*^0 , G_* , J и H_* — подлежащие определению матрицы. Наблюдатель генерирует невязку $r(t) = Cy(t) - y_*(t)$, где C — некоторая матрица-строка, также подлежа-

шая определению. При отсутствии дефектов невязка должна быть равна нулю, т. е. быть нечувствительной к дестабилизирующим факторам. При появлении дефекта равенство $r(t) = 0$ нарушается.

Матрицы диагностируемой системы и наблюдателя связаны известными соотношениями [4–6]:

$$CH = H_*\Phi, \quad \Phi F^0 = F_*^0\Phi + JH, \quad \Phi G = G_*. \quad (4)$$

Условия чувствительности невязки к дефектам и нечувствительности к дестабилизирующим факторам имеют вид

$$\Phi L \neq 0, \quad \Phi E = 0. \quad (5)$$

Предполагается, что структура модели билинейного наблюдателя аналогична модели (1), поэтому в соответствии с логико-динамическим подходом [5] введем семейство матриц-строк $\{F_*^{ij}\}$ такое, что выполняется условие

$$F_*^{ij}x(t) = F_*^{ij}x_*(t) \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Так как $x_*(t) = \Phi x(t)$, то $F_*^{ij} = F_*^{ij}\Phi$, т. е. каждая строка матрицы F_*^i линейно выражаются через строки матрицы Φ , откуда следует, что равенство $F_*^{ij} = F_*^{ij}\Phi$ эквивалентно равенству

$$\text{rank}(\Phi) = \text{rank} \begin{bmatrix} \Phi \\ F_*^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

являющимся дополнительным ограничением на матрицу Φ , о чем было сказано во Введении.

2. УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Для возможности построения наблюдателя, нечувствительного к дестабилизирующим факторам, должны выполняться определенные условия; получим их, введя несколько необходимых для дальнейшего элементов.

Известно [5–7], что линейный наблюдатель может быть реализован в каноническом виде с матрицами

$$F_*^0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \Lambda & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Lambda & \dots & 0 \\ \dots & \Lambda & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \Lambda & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad H_* = [1 \ 0 \ 0 \ \Lambda \ 0] \quad (7)$$

без увеличения его размерности. Пусть E_* — матрица максимального ранга, удовлетворяющая равенству $E_*E = 0$. Из ее определения следует, что условие $\Phi E = 0$ можно записать в виде $\Phi = NE_*$ для некоторой матрицы N .

Анализ начнем с первого из соотношений (4), которое с учетом вида матрицы H_* из канонической формы (7) и условия $\Phi = NE_*$ можно записать в виде $CH = N_1E_*$ или $CH - N_1E_* = 0$, где N_1 — пер-

вая строка матрицы N . Перепишем последнее равенство в блочной форме:

$$[C | -N_1] \cdot \begin{bmatrix} H \\ E_* \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

Отсюда следует, что между строками матриц H и E_* имеется линейная зависимость, откуда нетрудно заключить, что это равенство эквивалентно ранговому неравенству

$$\text{rank} \begin{bmatrix} H \\ E_* \end{bmatrix} < \text{rank}(H) + \text{rank}(E_*). \quad (9)$$

Если оно выполняется (это можно проверить с помощью математических пакетов, например, MATLAB), то решая однородное алгебраическое уравнение (8), можно определить матрицы C_0 и N_1^0 , строки которых представляют собой все линейно независимые решения этого уравнения; число та-

ких решений равно $n - \text{rank} \begin{bmatrix} H \\ E_* \end{bmatrix}$. Сами матрицы C и N_1 будут являться линейной комбинацией строк

этих матриц, т. е. $C = RC^0$ и $N_1 = RN_1^0$ для некоторой матрицы R . Невыполнение условия (9) означает, что наблюдатель, нечувствительный к дестабилизирующим факторам, построить невозможно.

Перейдем к анализу второго из соотношений (4). Умножая обе его части на матрицу E справа и учитывая условия $\Phi = NE_*$ и $\Phi E = 0$, получим в итоге соотношение $NE_*F^0E = JHE$ или в блочной форме

$$[N | -J] \cdot \begin{bmatrix} E_*F^0E \\ HE \end{bmatrix} = 0. \quad (10)$$

Как и ранее, можно показать, что это равенство эквивалентно ранговому неравенству

$$\text{rank} \begin{bmatrix} E_*F^0E \\ HE \end{bmatrix} < \text{rank}(E_*F^0E) + \text{rank}(HE). \quad (11)$$

Пусть выполняется условие (11), т. е. для некоторых матриц N и J справедливо соотношение (10); представим тогда его в виде $(NE_*F^0 - JH)E = 0$, откуда согласно определению матрицы E_* следует, что для некоторой матрицы K выполняется равенство

$$NE_*F^0 - JH = KE_*. \quad (12)$$

Поскольку матрица K может быть выбрана произвольным образом, примем ее в виде $K = F_*^0N$ для некоторой матрицы F_*^0 , не обязательно совпадающей с приведенной в выражении (7). Тогда если положить $NE_* = \Phi$, то получим $KE_* = F_*^0NE_* = F_*^0\Phi$,



и равенство (12) совпадет со вторым из соотношений (4). Последнее означает следующее. Из уравнения (10) могут быть определены матрицы N^0 и J^0 , строки которых представляют собой все линейно независимые решения этого уравнения. Эти матрицы можно использовать в качестве основы для построения наблюдателя; при этом, однако, возникают задачи определения минимально возможной размерности наблюдателя и построения матриц N и J при реализации наблюдателя минимальной размерности. Мы выберем для построения наблюдателя другой путь, воспользовавшись канонической формой матрицы F_*^0 , что даст определенные преимущества при решении этой задачи.

Невыполнение условия (11) означает, что наблюдатель, нечувствительный к дестабилизирующим факторам, построить невозможно.

Получим еще одно условие возможности построения наблюдателя, непосредственно не связанное с дестабилизирующими факторами. В качестве решения уравнений (8) и (10) (при условии их разрешимости) выше были определены матрицы N_1^0 и N^0 . Поскольку эти уравнения независимы друг от друга, их решения также будут линейно независимыми. Напомним, что линейная комбинация строк матрицы N_1^0 должна быть первой строкой матрицы N в соответствии с приведенным выше соотношением $N_1 = RN_1^0$. Поскольку строки матрицы N формируются как линейные комбинации строк матрицы N^0 , то для некоторой матрицы Q должно выполняться равенство $N_1 = RN_1^0 = QN^0$. Как и выше, можно показать, что это равенство эквивалентно ранговому неравенству

$$\text{rank} \begin{bmatrix} N_1^0 \\ N^0 \end{bmatrix} < \text{rank}(N_1^0) + \text{rank}(N^0), \quad (13)$$

которое можно назвать условием согласования уравнений (8) и (10).

Последнее условие возможности построения наблюдателя связано с его нелинейным характером, оно может быть получено следующим образом. Как было показано выше, для матриц F^{ij} , F_*^{ij} и Φ выполняется соотношение $F^{ij} = F_*^{ij} \Phi$, $j = 1, 2, \dots, n$, или $F^j = F_*^j \Phi$; поскольку $\Phi = NE_*$, то $F^i = F_*^i NE_*$, $i = 1, 2, \dots, m$. Полученное равенство можно рассматривать как условие возможности построения билинейного наблюдателя, нечувствительного к дестабилизирующим факторам; в ранговой форме оно выглядит следующим образом:

$$\text{rank}(E_*) = \text{rank} \begin{bmatrix} E_* \\ F^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (14)$$

3. СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Перед началом процедуры синтеза наблюдателя, который должен быть нечувствителен к дестабилизирующим факторам, необходимо проверить условия (9), (11), (13) и (14). Если хотя бы одно из них не выполняется, то такой наблюдатель построить невозможно; в этом случае необходимо обратиться к робастным методам, обеспечивающим минимальную чувствительность к этим факторам; они изложены, в частности, в работе [8].

Пусть указанные выше условия выполняются; известно [5, 6], что используя каноническую форму (7) матриц F_*^0 и H_* , первое и второе из соотношений (4) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= CH, \quad \Phi_i F^0 = \Phi_{i+1} + J_i H, \\ i &= 1, 2, \dots, k-1, \quad J_k H = \Phi_k F^0, \end{aligned} \quad (15)$$

где Φ_i и J_i — i -е строки матриц Φ и J , соответственно, k — размерность наблюдателя. Как было отмечено ранее, в случае, когда уравнение (8) имеет несколько линейно независимых решений, матрицу-строку C первого из равенств (15) можно определить в виде $C = RC^0$. С учетом последнего выражения соотношения (15) можно свернуть в одно уравнение:

$$\begin{aligned} RC^0 H (F^0)^k &= J_1 H (F^0)^{k-1} + J_2 H (F^0)^{k-2} + \dots \\ &\dots + J_k H. \end{aligned} \quad (16)$$

Для определения минимальной размерности наблюдателя и описывающих его матриц, предлагается следующий алгоритм, являющийся модификацией алгоритма, предложенного в работах [5, 6].

Шаг 1. Положим $k = 1$.

Шаг 2. Если уравнение (16) разрешимо для некоторых матриц-строк R, J_1, J_2, \dots, J_k (это можно проверить с помощью пакета MATLAB), переходим к шагу 4.

Шаг 3. Положим $k = k + 1$ и перейдем к шагу 2.

Шаг 4. Рассчитаем строки матрицы Φ : $\Phi_1 = RC^0 H$, $\Phi_{i+1} = \Phi_i F - J_i H$, $i = 1, 2, \dots, k-1$. Если матрица Φ не удовлетворяет условиям (5) и (6), находим другое решение уравнения (16), в противном случае переходим к шагу 3.

Шаг 5. Положим $G_* = \Phi G$ и найдем матрицы F_*^{ij} из линейного алгебраического уравнения $\Phi^T F_*^{ijT} = F^{ijT}$, $G_*^j = \Phi G_j$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$.

На третьем шаге решения задачи полученный линейный наблюдатель преобразуется в билинейный. Для этого в модель (3) добавляется нелинейная составляющая

$$\sum_{i=1}^m u_i(t) \sum_{j=1}^n G_*^j F_*^{ij} x_*(t);$$

в результате получается модель диагностического наблюдателя для билинейной системы:

$$\dot{x}_*(t) = F_*^0 x_*(t) + G_* u(t) + J y(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t) \sum_{j=1}^n G_*^j F_*^{ij} x_*(t), \quad y_*(t) = H_* x_*(t). \quad (17)$$

4. УСТОЙЧИВОСТЬ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Наблюдатель (17) с матрицей F_*^0 из соотношения (7) будет неустойчивым. Чтобы обеспечить его устойчивость, необходимо сделать устойчивой эту матрицу, для чего в наблюдатель вводится обратная связь и соответствующим образом корректируется матрица J . А именно, если $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ — коэффициенты обратной связи, обеспечивающие необходимую устойчивость матрицы F_*^0 , то i -я строка J_i матрицы J заменяется строкой $J_i - \beta_i C$, $i = 1, 2, \dots, k$. Очень важно, что матрица Φ не изменяется в этом случае, следовательно, основные свойства наблюдателя (нечувствительность к дестабилизирующим факторам и чувствительность к дефектам) также не изменяются. Действительно, рассмотрим i -ю ($i < k$) строку второго из матричных уравнений (4) с матрицей F_*^0 в форме

$$F_*^0 = \begin{bmatrix} \beta_1 & 1 & 0 & \Lambda & \dots & 0 \\ \beta_2 & 0 & 1 & \Lambda & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_k & 0 & 0 & \Lambda & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

и строки матрицы J_i заменим на $J_i - \beta_i C$:

$$\beta_i \Phi_1 + \Phi_{i+1} + (J_i - \beta_i C)H = \Phi_i F_*^0.$$

Так как $CH = \Phi_1$, то отсюда следует второе из равенств (15); аналогичный результат будет и при $i = k$. Следовательно, матрица Φ , найденная по алгоритму, остается неизменной при описанных изменениях в матрице F_*^0 . Таким образом, проблемы нечувствительности наблюдателя к дестабилизирующим факторам и устойчивости матрицы F_*^0 могут быть решены независимо, матрицы G_* и F_*^i при изменении показателей устойчивости не меняются. Эти обстоятельства и составляют преимущества предлагаемого метода перед известными [2, 3], о чем было сказано во Введении.

5. МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА

1. Дополнительное ограничение (6) на матрицу Φ может быть ослаблено расширением вектора $x_*(t)$ за счет вектора $y(t)$ путем замены уравнения

$$F^i x(t) = F_*^i x_*(t) \text{ на } F^i x(t) = F_*^i \begin{bmatrix} x_*(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = F_*^i \begin{bmatrix} \Phi x(t) \\ Hx(t) \end{bmatrix}.$$

В результате условие (6) принимает вид

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \Phi \\ H \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} \Phi \\ F^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

что позволяет получить наблюдатель меньшей размерности. Кроме того, ослабляется условие (14), которое теперь принимает вид

$$\text{rank} \begin{bmatrix} E_* \\ H \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} E_* \\ F^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Оно, однако, становится только необходимым, поскольку из того, что строки матрицы F^i выражаются через строки матриц E_* и H , не следует, что они будут выражаться и через строки матриц $\Phi = NE_*$ и H .

2. Известно [1, 5], что для дискретной и непрерывной линейных систем все основные соотношения, связанные с построением наблюдателей, одинаковы. Поскольку процедура построения билинейного наблюдателя основана на линейной процедуре, то все изложенное ранее будет справедливым и для дискретной билинейной модели вида

$$x(t+1) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t) F^i x(t) + Lf(t) + E_p(t), \quad y(t) = Hx(t).$$

3. Хотя изложенное выше относилось к задаче обнаружения дефектов, нетрудно распространить это на задачу поиска дефектов, когда система описывается моделью

$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t) F^i x(t) + \sum_{j=1}^p L_j f_j(t) + E_p(t), \quad y(t) = Hx(t),$$

где слагаемое $L_j f_j(t)$ описывает влияние j -го дефекта на систему. Диагностирование в этом случае осуществляется банком наблюдателей, каждый из которых должен быть чувствителен к одной группе дефектов и нечувствителен к другой, а также к дестабилизирующим факторам. В отличие от более простой задачи обнаружения дефектов здесь возникает ряд новых задач, в частности, установление отношения частичного порядка на множестве дефектов; выбор групп дефектов, к которым отдельные наблюдатели должны быть чувствительны и, напротив, нечувствительны; вопросы построения специальной матрицы, устанавливающей систему соотношений между дефектами и невязками, на



основе которой принимается решение о том, какой именно дефект возник в диагностируемой системе. Поскольку эти вопросы детально рассмотрены в работе [9], мы не будем на них останавливаться. Отметим только, что если j -й наблюдатель должен быть чувствителен к дефектам с номерами j_1, j_2, \dots, j_q , то вместо матрицы L в описанном выше подходе необходимо использовать блочную матрицу $L_j = [L_{j_1} | L_{j_2} | \dots | L_{j_q}]$, вместо матрицы E — блочную матрицу $[E | \bar{L}_j]$, где L_{j_i} — столбец матрицы L с номером j_i , \bar{L}_j — матрица, содержащая все столбцы матрицы L с номерами, отличными от j_1, j_2, \dots, j_q .

4. Если дефекты проявляются через входящие в описание диагностируемой системы параметры, описанный в работе подход полностью сохраняется; покажем это в случае одного параметра. Пусть динамика диагностируемой системы описывается моделью

$$\dot{x}(t) = F^0(\gamma)x(t) + G(\gamma)u(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t)F^i x(t) + Ep(t), \quad (18)$$

где γ — параметр. Предполагается, что при появлении дефекта параметр отклоняется от своего номинального значения γ_0 и становится неизвестной функцией времени. Для приведения этой задачи к рассмотренному выше случаю разложим матричные функции $F^0(\gamma)$ и $G(\gamma)$ в ряд Тейлора в окрестности номинального значения параметра γ_0 , ограничившись только его линейной частью:

$$F^0(\gamma) = F^0(\gamma_0) + \frac{dF^0}{d\gamma}(\gamma - \gamma_0) = F^0 + K(\gamma - \gamma_0),$$

$$G(\gamma) = G(\gamma_0) + \frac{dG}{d\gamma}(\gamma - \gamma_0) = G + \Gamma(\gamma - \gamma_0)$$

и подставим полученные выражения в уравнение (18) вместо матриц $F^0(\gamma)$ и $G(\gamma)$:

$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^m u_i(t)F^i x(t) + [K | \Gamma] \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} (\gamma - \gamma_0) + Ep(t). \quad (19)$$

Сравнивая полученное уравнение с моделью (1), нетрудно заключить, что роль матрицы L в настоящем случае играет блочная матрица $[K | \Gamma]$, роль функции $f(t)$ — векторная функция $\begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} (\gamma - \gamma_0)$.

При наличии нескольких — p — параметров каждого из них в выражении (19) будет соответствовать

слагаемое вида $[K_i | \Gamma_i] \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} (\gamma_i - \gamma_{i0})$, $i = 1, 2, \dots, p$, где матрицы K_i и Γ_i представляют собой частные производные от матричных функций $F^0(\gamma)$ и $G(\gamma)$ по i -й компоненте γ_i вектора γ , соответственно, γ_{i0} — номинальное значение i -го параметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное преимущество предложенного в работе логико-динамического подхода к диагностированию билинейных систем состоит в том, что проблемы нечувствительности наблюдателя к дестабилизирующим факторам (вместе с чувствительностью к дефектам) и устойчивости матрицы F_*^0 могут быть решены независимо друг от друга. При этом остальные матрицы, описывающие наблюдатель, не меняются при изменении его показателей устойчивости. Полученные условия возможности построения наблюдателя, нечувствительного к дестабилизирующим факторам, могут быть применены к линейным системам, а также системам с нелинейностями вида sign , sin , cos , ln и другим, для которых может быть использован логико-динамический подход.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.; СПб.: Изд-во МГУ-ГРИФ, 1998. — 256 с.
2. Shields D. N. Fault diagnosis in bilinear systems — A survey // Proc. European Control Conference ECC'95. — Rome, 1995. — P. 360–366.
3. Shields D. N. Qualitative approaches for fault diagnosis based on bilinear system // Proc. 13-th World Congress IFAC. — San Francisco, — 1996. — Vol. N. — P.151–156.
4. Frank P. M. Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge-based redundancy — A survey and some results // Automatica. — 1990. — Vol. 26. — P. 459–474.
5. Жирабок А. Н., Усольцев С. А. Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 149–159.
6. Zhirabok A., Usoltsev S. Fault diagnosis in nonlinear dynamic systems via linear methods // CD ROM Proc. 15 IFAC World Congress. — Barcelona, Spain, 2002.
7. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование линейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 8. — С. 120–128.
8. Lou X. C., Willsky A. S., Verghese G. C. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems // Automatica. — 1996. — Vol. 22. — P. 333–344.
9. Жирабок А. Н. Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования на основе обобщенных алгебраических инвариантов // Автоматика и телемеханика. — 1994. — № 7. — С. 160–169.

☎ (4232) 45-08-64

e-mail: zhirabok@mail.ru



ИТЕРАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ РОБАСТНОГО МНОГОМЕРНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКЦИОННО-РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ

А. Ю. Торгашов

Предложен метод синтеза робастных многомерных регуляторов, имеющих ПИД-структуру, на основе оценки взаимного влияния контуров регулирования в виде мультипликативной формы представления неопределенности модели объекта управления. На каждой итерации корректируются критерии робастного качества связанных одноконтурных систем управления. Приведены результаты промышленных испытаний робастного многомерного ПИД-регулятора для управления режимами реакционно-ректификационной колонны.

ВВЕДЕНИЕ

Для улучшения качества регулирования многомерных химико-технологических объектов довольно широко применяются пакеты программ, реализующие прогнозирующее управление (RMPCT “Honeywell”, DMC “Aspen” и др.) [1]. Однако их применение требует осуществления режима непосредственного цифрового управления исполнительными механизмами, для чего необходимо определенное коммутационное оборудование, которое не всегда доступно в производственных условиях. В связи с этим возникает задача определения оптимальных параметров локальных регуляторов, часто имеющих ПИД-структуру.

В работах [2–4] предложено рассматривать задачу синтеза робастного многомерного ПИД-регулятора как оптимизационную и применять для ее решения метод последовательного квадратичного программирования или линейные матричные неравенства. Такие пути решения характеризуются высокой размерностью вектора оптимизируемых параметров и ведут к усложнению анализа, если учитывать неопределенность или транспортные запаздывания моделей перекрестных каналов. Альтернативный итерационный подход более практичен [5], так как требует меньших вычислительных затрат благодаря независимому расчету одноконтурных систем управления. Он базируется на оценке частотного диапазона полос пропускания каждого контура и нахождении таких значений параметров регуляторов, при которых структуриро-

ванное сингулярное число системы управления меньше единицы. Недостатком исследований, посвященных итерационному методу, является отсутствие оценок взаимного влияния контуров регулирования, из которых бы исходили требования к робастной устойчивости и качеству для отдельно взятых одноконтурных систем управления, а также эвристическое руководство по выбору диапазонов частот полос пропускания контуров.

В настоящей работе развивается итерационный метод параметрического синтеза робастных многомерных ПИД-регуляторов, гарантирующих устойчивость и заданное качество функционирования системы управления в условиях взаимного влияния контуров регулирования, неточности и нелинейности модели управляемого процесса на примере производственной реакционно-ректификационной колонны.

1. МОДЕЛЬ РЕАКЦИОННО-РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

В промышленности все больше появляется так называемых совмещенных химико-технологических процессов. Их преимущество состоит в низких энергопотреблении и капитальных затратах благодаря организации одновременного протекания нескольких физико-химических процессов в одном аппарате. Например, совмещение химического преобразования веществ и их ректификации осуществляется в реакционно-ректификационных колоннах [6]. Такие химико-технологические



объекты существенно нелинейны и нестационарны в силу своей природы (дрейф скоростей химических реакций при колебаниях температуры и давления, изменение активности катализаторов, непостоянство гидродинамического режима и др.), что является мотивацией синтеза робастного управления. Кроме этого, аналитическое конструирование нелинейного регулятора ограничено высокой размерностью динамической модели процесса ректификации, которая может описываться системой из нескольких сотен нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений [7]. Поэтому в условиях производства для синтеза систем управления применяют эмпирические динамические модели [8].

На рис. 1 представлена реакционно-ректификационная колонна производства диметилацетамида. Она представляет собой объект управления с тремя входами $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)^T$ и тремя выходами $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3)^T$. Давление P (выход y_1) регулируют изменением молярного соотношения (FRC — вход u_1) потоков-реагентов S_1 (уксусная кислота) и S_2 (диметиламин). Температура T (выход y_2) поддерживается путем манипуляции расходом греющего водяного пара V (вход u_2), используемого для создания паров внутри колонны. Часть этих паров направляют обратно в колонну после конденсации наверху, а оставшейся частью конденсата — потоком D (вход u_3) — контролируют уровень жидкости L (выход y_3) в нижней части аппарата. Внутри колонны на специальных контактных устройствах (тарелках) осуществляются взаимодействие встречно-направленных потоков жидкости пара (ректификация) и химическое преобразование веществ потоков S_1 и S_2 в диметилацетамид.

После обработки результатов промышленных тестов получена следующая передаточная матрица (ПМ) колонны для номинального режима:

$$\mathbf{G}(s) = \begin{pmatrix} \frac{0,82s + 0,026}{9,61s^2 + s} e^{-3s} & \frac{5,8s + 0,14}{109s^2 + 20,8s + 1} e^{-2s} & \frac{-3,6s^2 - 0,1s - 0,006}{116s^3 + 26,9s^2 + s} e^{-2s} \\ -0,17 e^{-5s} & \frac{-3,66s - 0,2}{193s^2 + 21,6s + 1} e^{-5s} & \frac{0,207}{37,4s + 1} e^{-2s} \\ \frac{0,003}{30,9s^3 + 11,1s^2 + s} e^{-6s} & \frac{0,015s - 0,0003}{6s^2 + 4s + 1} e^{-s} & \frac{-0,1s - 0,007}{40,1s^2 + s} e^{-5s} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Реализация ПИД-регуляторов осуществлялась на промышленных микропроцессорных контроллерах, поэтому матрица (1) содержит элементы в виде передаточных функций (ПФ) с отмасштабированными коэффициентами усиления для диапазона изменения значений выходов от 0 до 100 %, а постоянные времени указаны в минутах.

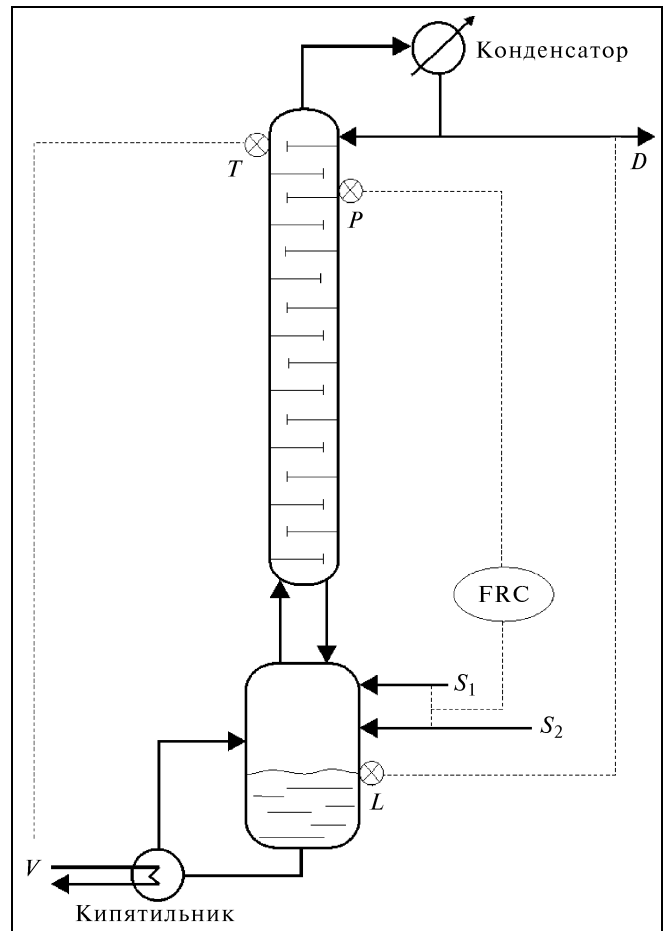


Рис. 1. Конфигурация многоконтурной системы управления реакционно-ректификационной колонной

Конфигурация системы управления (см. рис. 1) выбрана, исходя из анализа составляющих матрицы относительных коэффициентов усиления $\Lambda(j\omega) = \mathbf{G}(j\omega) \cdot (\mathbf{G}(j\omega))^{-1T}$ [9]. Модули диагональных элементов матрицы $\Lambda(j\omega)$ имеют значения в пределах единицы, за исключением диапазона частот от 0,1 до 1,0 рад/мин, в котором проявляется взаимовлияние каналов регулирования, т. е. модули внедиагональных элементов $\Lambda_{ij}^{i \neq j}(j\omega)$ приближаются к единице (рис. 2). В том же диапазоне частот число обусловленности матрицы $\mathbf{G}(j\omega)$ возрастает с 15 до 97 ($\approx 6,5$ раз), а в высокочастотной области колеблется около 55 (рис. 3), что указывает на наличие чувствительности процесса управления к неидеальности модели и обосновывает целесообразность синтеза робастного регулятора для данного примера.

Мультипликативная форма представления неидеальности (неопределенности) модели является удобным инструментом для вывода условий робастной устойчивости и качества систем управления

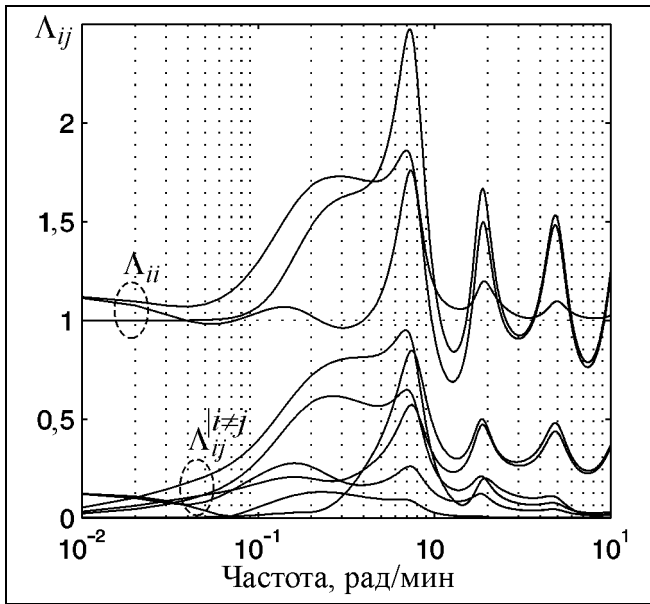


Рис. 2. Зависимости элементов матрицы относительных коэффициентов усиления от частоты ($i, j = 1, 2, 3$)

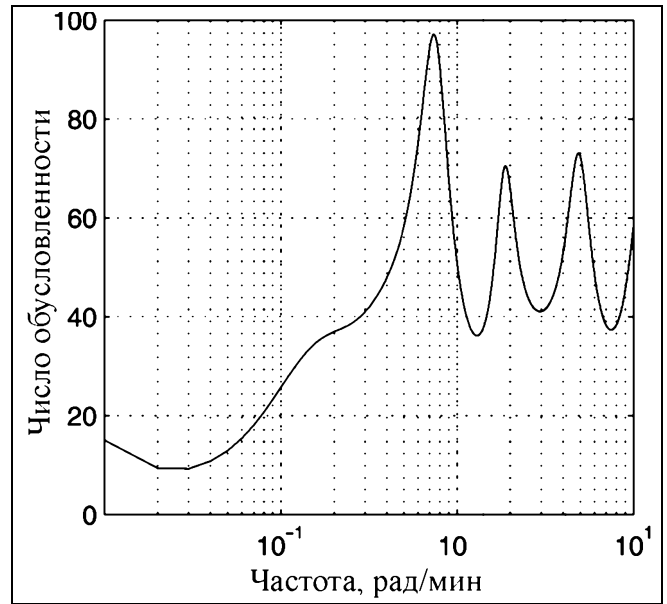


Рис. 3. Зависимость числа обусловленности матрицы (1) от частоты

[9]. Для диагональных элементов матрицы (1) выбраны следующие весовые ПФ для описания их неопределенности в мультипликативной форме:

$$W_1^1(s) = \frac{s+0,01}{0,18s+0,02}; \quad W_1^2(s) = \frac{s+0,02}{0,29s+0,06};$$

$$W_1^3(s) = \frac{s+0,009}{0,2s+0,03}. \quad (2)$$

Выражения (2) получены из условий реальной области параметрической и структурной неопределенности матрицы $\mathbf{G}(j\omega)$; верхний индекс соответствует номеру диагонального элемента матрицы (1).

Задача синтеза робастного H_∞ -оптимального ПИД-регулятора для i -й одноконтурной системы формулируется следующим образом.

Найти

$$\max_{C_1^i, C_2^i \in K} \gamma_i \quad (3)$$

при ограничениях

$$\|\gamma_i W_p^i(s) S_{ii}(s)\|_\infty < 1, \quad (4)$$

$$\|W_u^i(s) T_{ii}(s)\|_\infty < 1, \quad (5)$$

где C_1^i и C_2^i — ПФ, описывающие i -й ПИД-регулятор для контроллеров типа “Yokogawa” [10]; K — область допустимых значений функций C_1^i и C_2^i ; $S_{ii}(s)$ — функция чувствительности i -й однокон-

турной системы, являющаяся элементом матрицы $\mathbf{S} = (\mathbf{I} - \mathbf{G}\mathbf{C}_1)^{-1}$; W_p^i — весовая ПФ, задающая желаемую динамику i -го замкнутого контура; $T_{ii}(s)$ — дополнительная функция чувствительности; $\mathbf{T} = \mathbf{S}\mathbf{G}\mathbf{C}_2$; \mathbf{C}_1 и \mathbf{C}_2 — диагональные матрицы, элементами которых являются ПФ C_1^i и C_2^i ; γ_i — вещественные числа, характеризующие степень приближения к желаемой динамике; $i = 1, \dots, n$; n — размерность вектора управлений \mathbf{u} и регулируемых переменных \mathbf{y} ; $W_u^i(s)$ — ПФ, выбираемая на каждой итерации синтеза из условия:

$$W_u^i(s) = \begin{cases} W_1^i(s), & \text{если } |\eta^i(j\omega)| > 1, \quad \forall \omega \\ W_2^i(s), & \text{если } |\eta^i(j\omega)| < 1, \quad \forall \omega, \end{cases} \quad (6)$$

где $|\eta^i(j\omega)| = \frac{|W_1^i(j\omega)|}{|W_2^i(j\omega)|}$.

Отличие постановки задачи итерационного робастного синтеза (3)—(5) от известных ранее [9] состоит в непосредственном рассмотрении взаимного влияния одноконтурных систем как мультипликативной неопределенности элементов $G_{ii}(s)$ в виде (6). Это позволяет выполнять расчет параметров i -го регулятора независимо, так как влияние остальных контуров учитывается с помощью ПФ $W_u^i(s)$. Метод получения ПФ $W_u^i(s)$ описан в § 2.



2. ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ КОНТУРОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МОДЕЛИ

Воздействие многоконтурной системы на i -й разомкнутый контур будем оценивать с помощью матриц \mathbf{R}^i , \mathbf{M}^i и \mathbf{D}^i размерностью $n \times n$ (рис. 4). Значения их элементов зависят от номера выбранного контура и равны нулю, за исключением элементов $D_{j1}^i = -1$, $R_{j1}^i = 1$, $M_{i1}^i = 1$ для $i, j = 1, \dots, n$. Например, если $i = 2$, то

$$\mathbf{D}^2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{M}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрицы \mathbf{R}^i , \mathbf{M}^i и \mathbf{D}^i выбраны, исходя из возможного наибольшего воздействия на i -ю одноконтурную систему остальными системами в условиях противоположной направленности возмущений и задающих сигналов. Матрицы (7) являются гибким инструментом для исследования динамического поведения системы в условиях реального расположения источников возмущений. Таким образом, робастный регулятор становится менее консервативным по сравнению с настройкой на минимизацию наибольших сингулярных чисел взвешенных матриц \mathbf{S} и \mathbf{T} [9], учитывающих наихудшую направленность возмущений и задающих сигналов, которая может и не встречаться в условиях функционирования системы управления химико-технологического объекта.

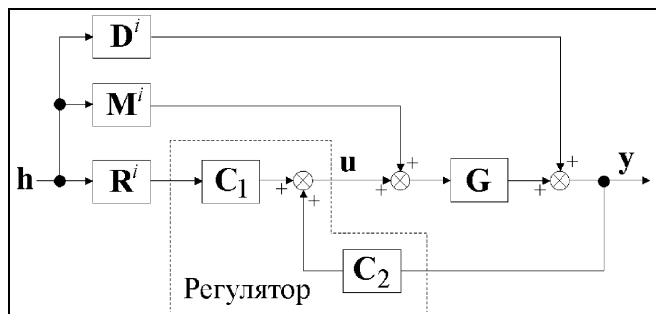


Рис. 4. Многоконтурная система управления для оценки $W_2^i(s)$; \mathbf{h} — вектор внешних входов

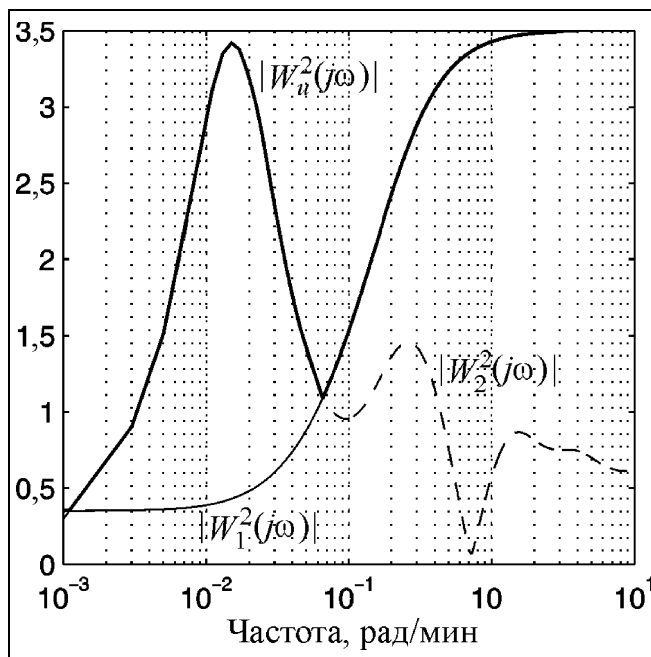


Рис. 5. Пример получения функции $W_u^2(j\omega)$

Задавшись начальными значениями элементов матриц \mathbf{C}_1 , \mathbf{C}_2 , \mathbf{R}^i , \mathbf{M}^i и \mathbf{D}^i , найдем ПМ системы (см. рис. 4):

$$\Phi^i(s) = \frac{\mathbf{y}(s)}{\mathbf{h}(s)} = \mathbf{T}\mathbf{R}^i + \mathbf{S}\mathbf{G}\mathbf{M}^i + \mathbf{S}\mathbf{D}^i. \quad (8)$$

Здесь ПФ $\Phi_{ii}^i(s)$ есть приведенное взаимное влияние многоконтурной системы, оказываемое на i -й контур. Для того чтобы выразить ее в виде мультипликативной неопределенности к функции $G_{ii}(s)$, выполним следующие вычисления:

$$W_2^i(s) = \frac{\Phi_{ii}^i(s) - G_{ii}(s)}{G_{ii}(s)}. \quad (9)$$

Пример получения выражения (6) по формуле (9) для матриц (1) и (7) представлен на рис. 5, из которого следует, что область неопределенности для модели объекта одноконтурной системы расширяется, благодаря воздействию 1-го и 3-го контуров.

3. ИТЕРАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ РОБАСТНОГО МНОГОМЕРНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Перед тем, как приступить к синтезу многомерного ПИД-регулятора, необходимо решить задачу H_∞ -оптимизации для отдельных одноконтурных систем без рассмотрения их взаимовлияния, учи-

тывая только функции $W_1^i(s)$ ($i = 1, \dots, n$). Это позволит получить приемлемые начальные значения элементов матриц C_1 и C_2 и сформировать желаемую динамику для i -го контура в виде ПФ

$$W_p^i(s) = \frac{T_{cl}^i s + 1}{T_{cl}^i s + 10^{-5}}, \text{ где } T_{cl}^i \text{ — постоянная времени замкнутого контура.}$$

Опишем итерационный синтез по шагам.

Шаг 0. Задаются значения элементов матриц C_1

и C_2 , функции $W_1^i(s)$ и желаемая динамика для каждой i -й одноконтурной системы, $N = 1$ (N — номер итерации).

Шаг 1. Определяется ПМ для системы (см. рис. 4) по выражению (8).

Шаг 2. Рассчитывается функция $W_u^i(s)$ по формуле (6).

Шаг 3. Решается поставленная задача синтеза i -го робастного регулятора (3)—(6).

Шаг 4. Одна итерация синтеза считается законченной, если шаги 1—3 выполнены для всех i от 1 до n . Значение N увеличивается на единицу.

Шаг 5. Если величины $\|C_1^N(j\omega) - C_1^{N-1}(j\omega)\|_\infty$ и $\|C_2^N(j\omega) - C_2^{N-1}(j\omega)\|_\infty, \forall \omega$ меньше заданного малого положительного числа, то итерационный синтез завершается.

Таблица позволяет сравнить результаты применения вышеизложенной процедуры итерационного синтеза. В верхней строке (первый вариант системы) указаны элементы матриц регулятора, полученные на основе метода минимизации структурированного сингулярного числа μ [9], которое дает оценку робастного качества функционирования системы управления (см. рис. 1). В ниж-

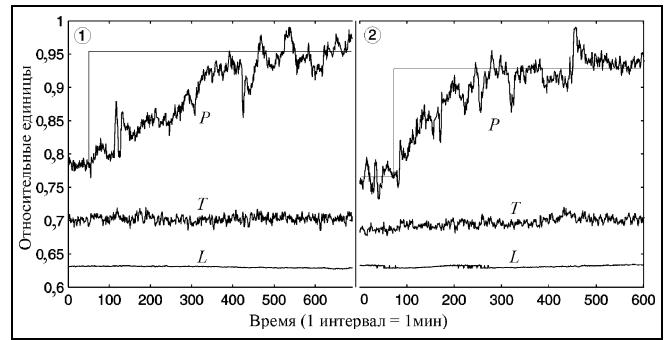


Рис. 6. Экспериментальное сравнение характеристик первого (слева) и второго (справа) вариантов системы управления

ней строке отражены результаты применения подхода, предложенного в данной работе. В обоих случаях значения T_{cl}^i ($i = 1, \dots, n$) принимались равным 120 мин. Как ожидалось, значение μ для второго варианта системы (см. нижнюю строку таблицы) оказалось больше ввиду его явного отсутствия в оптимизационной задаче (3)—(6), и это означает, что система управления менее робастна, но обладает более высоким быстродействием. Такой результат получен потому, что не учитывалась реакция системы в случае наихудшей направленности воздействий на значения элементов матриц S и T , традиционно выражаемая через их максимальные сингулярные числа. Была принята во внимание только та направленность, которая имеет место в реальных условиях, посредством матриц R^i и D^i (см. рис. 4).

В целях проверки результатов вычислений были проведены эксперименты для выяснения характеристик исследуемой системы управления реакционно-ректификационной колонной (см. рис. 1).

Параметры робастных регуляторов

C_1	C_2	$\max\{\mu\}, \forall \omega$
$\begin{bmatrix} \frac{0,22s-0,0014}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1,11s+0,044}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{33,3s+0,02}{s} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1,16 \cdot 10^{-5}s-0,0014}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-0,00037s+0,044}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-0,00017s-0,02}{s} \end{bmatrix}$	1,86
$\begin{bmatrix} \frac{-s-0,011}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1,516s+0,101}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2,22s+0,015}{s} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{9,26 \cdot 10^{-5}s+0,011}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-0,0008s-0,101}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-0,00013s-0,015}{s} \end{bmatrix}$	2,36



Давление P в колонне является основным и самым чувствительным к возмущениям параметром, который характеризует массообмен и скорость протекающих химических реакций. Технологи-операторы наиболее часто изменяют задающее воздействие P . Желаемые значения величин T и L практически не изменяются. На рис. 6 представлены отклики многоконтурной системы управления на ступенчатое изменение задания по выходной переменной P приблизительно при одинаковых начальных условиях. В обоих случаях наблюдалось успешное подавление взаимного влияния контуров. Высокое быстродействие и одинаковая робастность (по отношению к неточности модели и действующим высокочастотным возмущениям) получены с помощью предложенного второго варианта системы управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найденные значения элементов матриц (см. таблицу) соответствуют структуре ПИ-регулятора. Это связано с тем, что дифференциальная составляющая в алгоритме управления приводит к снижению робастности системы из-за увеличения коэффициентов усиления функций чувствительности (4), (5) в высокочастотной области. Данный факт согласуется с результатами исследований в работе [2].

Предложенная процедура итерационного синтеза позволяет рассчитывать каждую одноконтурную систему независимо, используя формализованную меру воздействия на нее других контуров в виде выражения (9). Проведенные промышленные испытания свидетельствуют об обоснованнос-

ти подхода, при котором исключается из рассмотрения наихудшая комбинация направленности действующих возмущений и задающих сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Qin S. J., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology // Control Eng. Practice. — 2003. — Vol. 11, N 7. — P. 733–764.
2. Bao J., Forbes J. F., McLellan P. J. Robust multiloop PID controller design: a successive semidefinite programming approach // Ind. Eng. Chem. Res. — 1999. — Vol. 38, N 9. — P. 3407–3419.
3. Zheng F., Wang Q.-G., Lee T. H. On the design of multivariable PID controllers via LMI approach // Automatica. — 2002. — Vol. 38, N 3. — P. 517–526.
4. Huang, X., Huang B. Multi-loop decentralized PID control based on covariance criterion: an LMI approach // ISA Transactions. — 2004. — Vol. 43, N 1. — P. 41–52.
5. Hovd M., Skogestad S. Sequential design of decentralized controllers // Automatica. — 1994. — Vol. 30, N 10. — P. 1601–1607.
6. Model-based design, control and optimization of catalytic distillation processes / C. Noeres, K. Dadhe, R. Gesthuisen, et al. // Chemical Engineering and Processing. — 2004. — Vol. 43, N 3. — P. 421–434.
7. Кривошеев В. П., Торгашов А. Ю. Управление процессом ректификации на основе обратной нелинейной модели при воздействии возмущений // Изв. АН ТиСУ. — 2002. — Т. 41, № 5. — С. 127–135.
8. Engell S., Fernholz G. Control of a reactive separation process // Chemical Engineering and Processing. — 2003. — Vol. 42, N 3. — P. 201–210.
9. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable feedback control — analysis and design. — Chichester: Wiley, 1996.
10. Astrom K. J., Hagglund T. PID controllers: theory, design and tuning. — North Carolina: Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1995.

☎ (4232) 31-02-02

e-mail: torgashov@iacp.dvo.ru



Журнал «Информатика и системы управления»

Приглашаем Вас принять участие в работе журнала «Информатика и системы управления», в котором публикуются новые теоретические и практические результаты ученых высших учебных заведений и научных организаций по следующим тематическим направлениям: организация баз данных; системы передачи данных; моделирование систем; медицинская информатика; геоинформационные системы; управление в социально-экономических системах; надежность и техническая диагностика; интеллектуальные системы; многопроцессорные вычислительные системы; адаптивные и робастные системы; микропроцессорные и цифровые системы; автоматизированные системы.

Единственный на Дальнем Востоке рецензируемый периодический журнал в области информатики, вычислительной техники и управления, зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовой коммуникации (свидетельство ПИ № 77-11796 от 04.02.02), выходит 2 раза в год (1 номер в полугодие), ISSN 1814-2400. В печатном виде он поступает в крупнейшие библиотеки и распространяется только по подписке. Авторы получают бесплатный экземпляр журнала, его подписной индекс в дополнительном каталоге «Роспечати» — 46123.

Наш адрес:

Амурский государственный университет, Игнатьевское шоссе, 21. Благовещенск Амурской обл., 675027.

Электронная версия журнала: http://www.amursu.ru/ics/index_ics.htm.

Справки по телефону (4162)39-46-50; e-mail: eremin@amursu.ru.

ВНУТРЕННЯЯ МОДЕЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ ТЕОРЕМ¹

Ч. 1. Общее описание модели

Т. Л. Гаврилова, А. С. Клещев

Для разработки автоматизированных систем конструирования правильных доказательств математических утверждений на основе математических знаний предложена модель математической практики, более адекватная, чем модели математической логики. Модель математической практики представлена в виде комбинации двух моделей: внутренней модели — формальной системы, и внешней модели, в рамках которой математик управляет процессом конструирования интуитивных доказательств. Сформулированы требования к внешней и внутренней моделям математической практики. Дано общее описание внутренней модели.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема автоматизации процесса конструирования правильных доказательств математических теорем является актуальной и для математического образования (обучения студентов доказательству теорем), и для математической практики (доказательства теорем профессиональными математиками). В работе [1] показано, что наиболее перспективны не автоматические, а автоматизированные (человеко-машинные) системы конструирования доказательств. Однако до сих пор и те, и другие системы основывались на моделях математической логики, предназначенных для исследования проблем метаматематики [2—5]. Именно поэтому эти системы служат целям обучения скорее математической логике, чем доказательству математических теорем. Такие модели неадекватно представляют математическую практику и потому неудобны для математиков и студентов, работаю-

щих с системами автоматизированного конструирования доказательств (САКД). Дальнейшее развитие САКД может быть связано с разработкой более адекватной модели математической практики [1]. Такую модель можно представить в виде комбинации двух моделей: внутренней модели — формальной системы, в рамках которой САКД осуществляет конструирование полных доказательств по информации, получаемой от математика, и внешней модели, в рамках которой математик управляет процессом конструирования интуитивных доказательств. Внутренняя модель отвечает за правильность сконструированных доказательств, а внешняя имитирует привычную для математиков систему понятий и представлений математической практики. Одним из недостатков существующих САКД как раз и является отсутствие в них внешней модели и использование в этом качестве внутренней модели.

В настоящем цикле статей на основе требований к внешней и внутренней моделям математической практики предлагается внутренняя модель для САКД. Данная статья является первой из цикла. В ней определяются требования к внешней и внутренней моделям математической практики, и дается общее описание внутренней модели.

¹ Работа выполнена при финансовом содействии программы № 16 Президиума РАН, проект «Теоретические основы интеллектуальных систем, основанных на онтологиях, для интеллектуальной поддержки научных исследований» и программы № 16 ОЭММПУ РАН, проект «Синтез интеллектуальных систем управления базами знаний и базами данных».



1. ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ МОДЕЛИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ

Каждая из моделей математической практики, и внешняя, и внутренняя, в свою очередь, состоит из четырех моделей: математического диалекта, знаний, способов рассуждения и доказательств. Далее приведены определения этих моделей и требования к ним.

Внешняя модель математического диалекта (ММД) — это язык, на котором САКД представляет математику математические знания. Этот язык должен быть достаточно богат, чтобы представленные на нем математические знания выглядели привычно и понятно для математика (не требовали изучения какого-либо неизвестного ему языка). Он должен быть расширяемым, как и математический диалект, а утверждения на нем должны интерпретироваться однозначно [1]. Кроме того, этот язык должен имитировать разделение математического диалекта на неформальную (естественно-языковую) и формальную части. *Внутренняя модель математического диалекта* — это формальный язык, на котором математические знания представляются в САКД. Он также должен быть расширяемым, утверждения на нем также должны однозначно интерпретироваться. Но в отличие от внешней модели, этот язык не должен имитировать разделение математического диалекта на неформальную и формальную части, а в его описании должны быть явно выделены формальный синтаксис, контекстные условия, логическая семантика и прагматика.

Внешняя модель математических знаний — это множество математических утверждений (аксиом, определений, теорем и лемм), представленных на языке внешней модели и доступных математику в процессе конструирования доказательств теорем с помощью САКД. *Внутренняя модель математических знаний* — это множество математических утверждений, представленных на языке внутренней модели и доступных САКД в процессе конструирования доказательств. Обе модели математических знаний должны допускать расширение новыми аксиомами, новыми определениями и вновь доказанными теоремами и леммами. Система автоматизированного конструирования доказательств должна поддерживать соответствие между внутренней и внешней моделями математических знаний.

Внешняя модель способов рассуждения — это множество описаний способов рассуждения, представленных на языке внешней модели и доступных математику в процессе конструирования доказательств теорем с помощью САКД. *Внутренняя модель способов рассуждения* — это множество описаний тех же способов рассуждения, но представленных

на языке внутренней модели и доступных САКД в процессе конструирования доказательств. Обе модели способов рассуждения должны быть достаточно богатыми, чтобы охватить принятые в математике способы рассуждения, и допускать расширение описаниями новых способов рассуждения. Система должна поддерживать соответствие между внутренней и внешней моделями способов рассуждения.

Внешняя модель доказательства теоремы — это текст интуитивного доказательства этой теоремы [1], представленный на языке внешней модели. *Внутренняя модель доказательства теоремы* — это структура данных САКД, представляющая полное доказательство этой теоремы [1]. Правильность доказательства теоремы (в том числе и интуитивного) должна следовать из возможности конструирования ее полного доказательства. Система должна поддерживать соответствие между внутренней и внешней моделями доказательств.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ МОДЕЛИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ

Рассмотрим более подробно, каким образом построена внутренняя модель математической практики, удовлетворяющая сформулированным выше требованиям.

Расширяемость языка ММД обеспечивается расширяемостью его синтаксиса, контекстных условий и семантики.

Расширяемость синтаксиса достигается благодаря средствам САКД, позволяющим описать (конкретный или абстрактный) синтаксис каждой новой конструкции (терма или формулы) языка и добавить это описание к описанию синтаксиса языка ММД. Заметим, что с этой точки зрения описание синтаксиса термов и формул можно рассматривать как расширение пустых множеств термов и формул языка ММД. Если САКД предоставляет средства описания конкретного синтаксиса, то в ее состав должен входить синтаксически управляемый синтаксический анализатор, например, YACC [6]; если же в САКД имеются средства описания абстрактного синтаксиса, то в ее состав должен входить универсальный структурный редактор, (см., например, работу [7]). Рассмотрим случай, когда описывается только конкретный синтаксис языка ММД.

Расширяемость контекстных условий следует из их определения. Контекстные условия языка ММД делятся на два класса. Контекстные условия первого класса суть ограничения, которые могут быть проверены по тексту на языке ММД. Контекстные условия второго класса задаются указанием для каждой конструкции языка ММД способов построения предложений, из справедливости

которых следует корректность этой конструкции. Проверка контекстных условий второго класса состоит в автоматическом (или автоматизированном) доказательстве этих предложений.

Внутренняя модель математических знаний состоит только из корректных конструкций. Как будет видно из дальнейшего изложения, она задает семантику языка ММД в том смысле, что она определяет множество тех предложений этого языка, про которые известно, что они истинны. Поэтому *расширяемость семантики* языка ММД обеспечивается расширяемостью внутренней модели математических знаний, которая достигается путем добавления новых истинных математических и метаматематических утверждений.

Язык ММД состоит из трех подязыков: языка представления математических утверждений, языка представления пропозициональных утверждений и метаязыка. Математические знания представляются на первом из них. Пропозициональные утверждения не могут быть представлены на этом языке, поэтому для их представления вводится специальный язык. Математические принципы и утверждения о синтаксических преобразованиях математических формул (например, правила дифференцирования или взятия неопределенного интеграла) также не могут быть представлены на первом подязыке, поэтому для их представления также вводится специальный язык (метаязык). Средства расширения имеет только язык представления математических утверждений. Метаязык, надстроенный над ним, расширяется автоматически при его расширении. Язык представления пропозициональных утверждений расширяемым не является.

Поскольку язык ММД является расширяемым, то можно говорить о версиях этого языка, причем в дальнейшем изложении считается, что каждая следующая версия языка является расширением предыдущей. Как обычно, *предложением* языка будем называть корректную формулу, не содержащую свободных вхождений переменных. *Экстенционалом версии языка* ММД будем называть множество всех предложений, представимых в этой версии языка. Это множество для нетривиальных версий языка будет бесконечным. Очевидно, что при переходе к следующей версии языка его экстенционал будет расширяться. Математика разбивает экстенционал языка ММД на два подмножества: истинных и ложных предложений. Цель математической практики состоит в явном описании множества тех предложений, про которые известно, что они истинны. Это множество описывается с помощью внутренней модели математических знаний как множество, состоящее из ядра внутренней модели знаний и его оболочки. *Ядро внутренней модели знаний* определяется как совокуп-

ность математических определений, пропозициональных тавтологий, математических аксиом и метаматематических аксиом, представленных на языке ММД. Ядро является, очевидно, расширяемым, поэтому можно говорить о состояниях этого ядра. Каждое следующее состояние ядра является расширением предыдущего. *Оболочка ядра* определяется как множество математических и метаматематических теорем, доказанных на основе ядра. Оболочка расширяется путем включения в нее вновь сформулированных на языке ММД теорем, доказанных на основе ядра. Поскольку оболочка также является расширяемой, то можно говорить и о ее состояниях. Каждое следующее состояние оболочки является расширением предыдущего.

Экстенционалом определения будем называть множество, состоящее из единственного предложения, имеющего форму равенства между определяемым термином и термом, задающим значение этого термина. *Экстенционалом пропозициональной тавтологии* будем называть множество предложений (конкретизаций), полученных из этой тавтологии заменой вхождений всех пропозициональных переменных на произвольные предложения. *Экстенционалом математического утверждения* (в частности, математической аксиомы) будем называть множество предложений (конкретизаций), полученных из этого утверждения заменой вхождений всех свободных переменных на произвольные, но «подходящие» термы без свободных переменных. *Экстенционалом метаматематического утверждения* (в частности, метаматематической аксиомы) будем называть объединение экстенционалов всех математических утверждений (конкретизаций), полученных из этого метаматематического утверждения заменой вхождений всех синтаксических переменных на произвольные, но «подходящие» термы без свободных переменных или предложения. *Экстенционалом ядра (оболочки)* внутренней модели знаний будем называть объединение экстенционалов всех элементов этого ядра (оболочки). Объединение экстенционалов ядра и оболочки внутренней модели знаний и есть множество тех предложений, про которые известно, что они истинны.

Как было указано выше, оболочка расширяется путем включения в нее теорем, доказанных на основе ядра. *Доказательство математической теоремы* сводится к доказательству ее конкретизации при подходящем наборе предположений о значениях свободных переменных. *Доказательство предложения, имеющего форму импликации*, сводится к доказательству заключения этой импликации в предположении истинности ее условия. Основным способом *доказательства предложения, не имеющего формы импликации*, является использование правила вывода *Modus ponens*: выбирается некото-



рое предложение, имеющее форму импликации и принадлежащее объединению экстенционалов ядра и оболочки; если Modus ponens используется для *декомпозиции*, т. е. требуется доказать предложение, совпадающее с заключением этой импликации, то это доказательство сводится к доказательству условий этой импликации; если же Modus ponens используется для *вывода*, т. е. истинны условия этой импликации (установлено, что они принадлежат объединению экстенционалов ядра и оболочки), то заключение этой импликации считается доказанным. *Доказательство предложения пусто*, если это предложение входит в объединение экстенционалов ядра и оболочки.

Способы рассуждений, которые используются при конструировании доказательств, делятся на *три класса*: с опорой на *пропозициональные тавтологии* (например, сведение доказательства равносильного утверждения к доказательству двух импликаций, доказательство от противного и т. п.); с опорой на *математические утверждения* (применение математических аксиом, теорем и лемм); с опорой на *математические принципы* (например, применение принципа полной математической индукции, принципа замены равных термов в формулах и т. п.). Все эти способы рассуждения представляются соответствующим образом во внутренней модели математических знаний: пропозициональными тавтологиями, математическими и метаматематическими утверждениями.

В процессе конструирования доказательства для каждого доказываемого предложения определяется множество *предположений*, при которых это предложение должно быть доказано. *Правильность полного доказательства предложения* обеспечивается проверкой условия, что при доказательстве этого предложения не было использовано предположений, не входящих в это множество.

Управление процессом конструирования доказательств в терминах внутренней модели сводится к выбору на каждом шаге процесса *цели* исполь-

зования правила вывода Modus ponens (для декомпозиции или для вывода), к выбору в модели знаний *способа рассуждения* на этом шаге и к подбору *посылок* для применения правила вывода Modus ponens.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы состоят в следующем. Определены требования к внешней и внутренней моделям математической практики для САКД. Дано общее описание внутренней модели, введен ряд определений, которые будут использованы в последующих статьях этого цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаврилова Т. Л., Клещев А. С.* Анализ подходов к решению проблемы правильности математических знаний // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 13–19.
2. *Чень Ч., Ли Р.* Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. — М.: Наука, 1983. — 320 с.
3. *ETPS: A System to Help Students Write Formal Proofs* / B. Andrews Peter, M. Bishop, E. Brown Chad, et al. // Research Report No. 03-002, April 2003 (Department of Mathematical Sciences. Carnegie Mellon University).
4. *JProver: Integrating Connectoin-Based Theorem Proving into Interactive Proof Assistants* / Schmitt S., Lorigo L., Kreitz C. and Nogin A. // International Joint.
5. *Ulrich Endriss.* The Interactive Learning Environment WinKE for Teaching Deductive Reasoning // First International Congress on Tools for Teaching Logic. King's College. — London, September 6, 2000.
6. *Stepheh C. Johnson.* Yacc: Yet Another Compiler-Compiler <<http://dinosaur.comilertools.net/yacc/>>.
7. *Орлов В. А., Клещев А. С.* Многоцелевой банк знаний. Ч. 3. Концепция универсального Редактора ИРУО. — Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2003. — 28 с. <www.iacp.dvo.ru/es/publ/186_3.rtf>.

☎(4232) 31-40-01, 31-04-24

e-mail: gavrilov@iacp.dvo.ru

kleshev@iacp.dvo.ru □

Новая книга

Абрамов О. В., Кондратьев Г. А. Автоматизированные информационно-управляющие системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 191 с.

Анализируется отечественный и зарубежный опыт применения современных методов, технических и программных средств для решения задач управления в условиях чрезвычайных ситуаций. Определены основные направления научно-исследовательских и проектных работ по созданию автоматизированных информационно-управляющих систем предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе информационных систем единых дежурно-диспетчерских служб регионов, городов и районов. Рассмотрены особенности создания и функционирования таких систем. Приведены примеры практического применения подобных систем в Приморском крае.

Для специалистов по вопросам управления в условиях чрезвычайных ситуаций.

ПРОБЛЕМНО-НЕЗАВИСИМЫЙ ГЕНЕРАТОР ТЕКСТОВ, УПРАВЛЯЕМЫЙ ОНТОЛОГИЕЙ¹

В. В. Грибова

Представлен метод автоматической генерации текстов по выходным данным прикладной программы — неупорядоченному множеству кортежей отношений реляционной базы данных. Описана основная идея подхода, управляющая генератором текста онтология, модель генерации текста, а также метод реализации подхода.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных характеристик современных программных систем различного назначения является возможность представления результатов их работы в соответствии с требованиями, определяемыми не только предпочтениями конкретного пользователя или групп пользователей, но, прежде всего, назначением программной системы и особенностями предметной области.

Существуют различные виды представления выходной информации — таблицы, графики, диаграммы. Особое место занимает представление выходных данных в виде текстов. При генерации таких текстов приходится решать три основные проблемы: каким образом задавать способ изложения текста; как породить текст, соответствующий этому способу изложения на основе выходных данных прикладной программы; как разметить этот текст, чтобы обеспечить возможность его дальнейшего использования.

В настоящее время рынок программных систем не предлагает универсальных средств генерации текстов для произвольных предметных областей. Представление результатов в виде текста возможно с помощью генераторов отчетов [1, 2]. Они, как правило, ориентированы на представление отчетов в виде таблиц, графиков, диаграмм, поэтому с их помощью можно сгенерировать только тексты простой структуры. Генераторы отчетов не имеют специальных средств анализа полученных резуль-

татов, а снабжены только функциями их фильтрации и сортировки. Технология формирования отчетов с помощью таких средств основана на создании шаблона отчета, который в большинстве случаев встраивается в приложение, что делает невозможными любые изменения получаемых отчетов без изменения самого приложения; многие генераторы отчетов формируют отчет в собственном формате без возможности его редактирования и изменения.

В данной работе предлагается метод автоматической генерации текстов произвольных структуры и содержания, управляемой онтологией на основе результатов работы прикладной программы, представленных в виде неупорядоченного множества кортежей отношений.

1. ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ПОДХОДА

Рассмотрим сначала неформальное описание основной идеи подхода. Стремление к снижению стоимости разработки и сопровождения программных систем приводит к необходимости предоставления разработчикам языков так называемого пятого поколения [3] — высокоуровневых средств описания и автоматической генерации исполнимого кода. Для решения задачи генерации текстов произвольной структуры и содержания в качестве высокоуровневого языка предлагается универсальная онтология, состоящая из конструкций для описания структуры и способа порождения текста, а также конструкций для описания методов анализа результатов (выходных данных прикладной программы). Онтология — явное описание или представление некоторой части концептуализации. Она может иметь различные формы, но обязательно включает в себя словарь терминов и некоторую

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН по программе № 15 ОЭМПУ РАН «Проблемы анализа и синтеза интегрированных технических и социальных систем управления», проект «Синтез интеллектуальных систем управления базами знаний и базами данных».

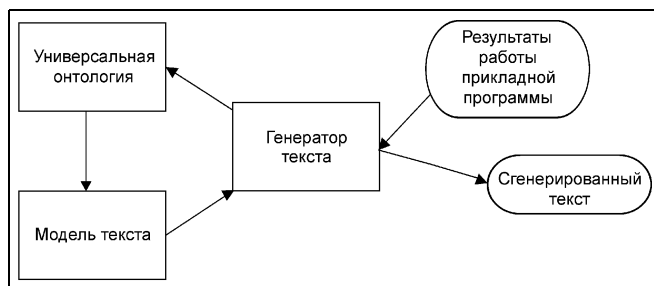


Рис. 1. Графическое представление основной идеи подхода

спецификацию их смысла, определения и указания о связи понятий, что в совокупности налагает структуру на предметную область и ограничивает возможные интерпретации терминов [4]. Используя онтологию, разработчик программного средства формирует модель порождения текста (далее модель текста) для конкретной задачи либо группы задач: конкретизирует значения терминов онтологии. Используя это описание и результаты работы прикладной программы, генератор, управляемый онтологией, автоматически генерирует текст заданной структуры и содержания. Графическое представление основной идеи подхода приведено на рис. 1.

Универсальную онтологию можно представить в виде $O = \langle W, G \rangle$, где W — конструкция для формального описания структуры и способа порождения текста, G — конструкция для задания метода анализа текста.

Конструкция W состоит из последовательности элементов описания текста w_1, \dots, w_n . Каждый элемент описания — конструкция, которая определяет зависимость порождаемого текста от выходных данных прикладной программы. Конструкциями онтологии для формального описания структуры и способа порождения текста служит *альтернатива*, *цикл*, *выводимое множество* и *строка*. Цикл и альтернатива, в свою очередь, также содержат элементы описания текста в качестве компонентов.

Конструкция для задания метода анализа текста G определяет, какие выходные данные прикладной программы анализируются в конструкции w_i . Конструкцию G назовем описанием переменной. Описание переменной G имеет вид: $P(c_1, \dots, c_{j^*}, \dots, c_n)$, где P — имя отношения, представляющего выходные данные прикладной программы, c_{j^*} — имя описываемой переменной, $c_1, \dots, c_{j-1}, c_{j+1}, \dots, c_n$ — имена вспомогательных переменных. Под множеством значений c_{j^*} переменной будем понимать множество всех j -х элементов кортежей отношения P . Множествами значений вспомогательных

переменных $c_1, \dots, c_{j-1}, c_{j+1}, \dots, c_n$ являются множества элементов кортежей того же отношения с номерами $1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$, соответственно.

Конструкция онтологии *альтернатива* имеет вид: $\langle G, \{\Omega_1, \dots, \Omega_m\} \rangle$. Здесь G — описание переменной, $\{\Omega_1, \dots, \Omega_m\}$ — описания альтернатив. Описание каждой альтернативы состоит из двух частей — множества условий выбора δ_k и варианта ψ_k — составного оператора, т. е. $\Omega_k = \langle \delta_k, \psi_k \rangle$, $1 \leq k \leq m$. Множество условий выбора δ_k задает либо некоторое число, обозначающее возможное число значений переменной, либо значение (или множество значений), которое может получить переменная по результатам работы прикладной программы, либо некоторую метку. Вариант ψ_k — это составной оператор, который будет выполняться, если значения переменной удовлетворяют условию выбора δ_k . Переменная из описания G удовлетворяет условию выбора δ_k , если либо число ее значений совпадает с числом в условии выбора, либо значение переменной (или подмножество ее значений) совпадает со значением (или подмножеством значений) в условии выбора. Выполнение определенной альтернативы состоит в выполнении варианта (составного оператора) первого по порядку описания альтернативы, для которого переменная из описания G удовлетворяет условию выбора. Если переменная из описания G не удовлетворяет ни одному из условий выбора, то выполняется альтернатива, условием выбора которой является метка.

Часто порождаемый текст должен содержать повторяющиеся части, и при каждом повторении эти части несколько отличаются друг от друга, причем эти отличия должны определяться выходными данными прикладной программы. Конструкция онтологии «цикл» служит для представления таких повторяющихся частей и имеет вид: $\langle G: усл, \alpha \rangle$. Здесь G — описание переменной, *усл* — условие, которое налагается на ее значения (условие может отсутствовать), α — тело цикла. Описание переменной необходимо для задания условия выполнения тела цикла: число повторений тела цикла, а также содержание изменяемых частей в теле цикла. Тело цикла — составной оператор. Содержание изменяемой информации при каждом выполнении тела цикла зависит от значений параметра цикла и вспомогательных переменных. При каждом выполнении тела цикла параметру цикла соответствует некоторое новое значение из множества его значений, определяемое результатами работы прикладной программы и условием «*усл*», которое налагается на значения переменной. Каждому значению переменной соответствуют подмножества значений вспомогательных переменных.

Конструкция онтологии *выводимое множество* указывает, что в тексте необходимо перечислить в определенном порядке (в соответствии с условием) все значения некоторой переменной. Данная конструкция имеет вид $\langle G: усл \rangle$, где G — описание переменной, «*усл*» — условие, которое налагается на ее значения (условие может отсутствовать). Условие определяет, в каком порядке значения переменной должны быть помещены в текст — в алфавитном порядке либо в порядке, который определен этим условием.

Конструкция онтологии *строка* предназначена для представления фиксированных фраз. Примером текстовых конструкций могут быть: «Фамилия, имя, отчество», «диагноз при поступлении», «лечащий врач» и др.

Одно и то же формальное задание конструкций W может соответствовать различным выходным данным прикладной программы, но оно должно быть согласовано с этими данными. Текст T , создаваемый на основе конструкций W , получается различным в зависимости от этих данных.

Таким образом, текст T генерируется на основе конструкций для описания структуры и способа порождения текста W , конструкций анализа результатов G , а также выходных данных прикладной программы, представленных в виде конечной совокупности отношений.

2. МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТА, УПРАВЛЯЕМОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ОНТОЛОГИЕЙ

Состояние вычислительного процесса на шаге m определим как четверку: $q_m = (A^m, P^m, T^m, N^m)$, где A^m — вектор значений переменных, P^m — вектор отношений циклов или альтернатив, T^m — текст, N^m — позиционный номер выполняемого элемента описания текста.

Вектор значений переменных имеет вид: $A^m = \langle a_1, a_2, \dots, a_{Nm} \rangle$, где Nm — число элементов вектора на шаге m , а каждый элемент вектора a_i для всех $i = 1, \dots, Nm$ есть пара $a_i = (nma_i, VAL_i)$. Здесь nma_i — имя переменной, VAL_i — множество значений переменной nma_i такое, что $VAL_i = \{val_1^i, \dots, val_p^i\}$, где val_j^i — значение переменной nma_i , $j = 1, \dots, p$, p — число значений переменной.

Вектор отношений циклов и альтернатив P^m имеет вид: $P^m = \langle p_1, \dots, p_{Km} \rangle$, Km — число элементов вектора в состоянии на шаге m , равное числу вложенных циклов и альтернатив, выполняемых на

шаге m . Каждый элемент вектора p_i для $i = 1, \dots, Km$ относится к одной из выполняемых на шаге m конструкций *цикл* и *альтернатива*, причем элемент вектора отношений p_1 относится к самой внешней конструкции *цикл* или *альтернатива*, элемент вектора отношений p_2 — к непосредственно вложенной в нее конструкции *цикл* или *альтернатива* и т. д., элемент вектора отношений p_{Km} — к самой внутренней конструкции *цикл* или *альтернатива*. Каждый элемент вектора p_i для всех $i = 1, \dots, Km$, имеет вид: $p_i = (p_i, nmv_i, Nc_i, Nqn_i, VALVC_i)$, где p_i — имя отношения, входящего в заголовок i -й вложенной конструкции *цикл* или *альтернатива*; nmv_i — имя переменной i -й вложенной конструкции *цикл* или *альтернатива*; Nc_i — число повторений i -го цикла или 0 для альтернативы; Nqn_i — номер состояния вычислительного процесса перед выполнением i -й конструкции *цикл* или *альтернатива*; $VALVC_i$ — множество уже пройденных значений переменной цикла nmv_i к шагу m , $VALVC_i = \{valvc_1, \dots, valvc_m\}$, где $valvc_j$ — значение переменной цикла $j = 1, \dots, m$.

Начальное состояние процесса генерации текста есть $q_1 = (A^1, P^1, T^1, N^1)$, где вектор значений переменных A^1 и вектор отношений цикла и альтернативы P^1 пусты (имеют размерность 0), текст T_1 в начальном состоянии — пустая строка, $N^1 = 1$.

Введем понятие «описание множества», которое имеет вид: $A_i(c_1^i, \dots, c_m^{i*}, \dots, c_n^i): усл$, где A_i — имя одного из отношений, представляющих выходные данные прикладной программы, c_1^i, \dots, c_n^i — имена переменных. Множеством значений каждой переменной c_j^i является множество всех j -х элементов кортежей — $\{a_j\}$ — отношения A_i из результатов ξ работы прикладной программы, c_m^{i*} — помеченная переменная, имеющая свою семантическую трактовку; которая описывается в контексте рассматриваемых далее конструкций; *усл* — условие, налагаемое на значения c_m^{i*} , которое может и отсутствовать. Условие задает порядок, в котором упорядочены значения переменной c_m^{i*} .

Процесс генерации текста по онтологии текста заключается в последовательном выполнении элементов описания текста, начиная с первого. При этом на каждом шаге формируется очередное состояние вычислительного процесса, которое зависит от выполняемого элемента описания w_i , состояния вычислительного процесса и результатов ξ ра-



боты прикладной программы. Будем считать, что в состоянии $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$ имеет место $N^s = i$.

Рассмотрим формирование очередного состояния для каждой из конструкций.

Пусть выполняемым элементом описания текста w_i является конструкция *строка*. Тогда следующее состояние процесса формирования текста есть $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$, причем $A^{s+1} = A^s$, $P^{s+1} = P^s$, $T^{s+1} = T^s + w_p$, где «+» — операция конкатенации, а значением N^{s+1} является позиционный номер, следующий за номером i в лексикографическом порядке. Если такого номера нет, то выполнение универсального рецепта на этом заканчивается.

Пусть выполняемым элементом описания текста w_i является конструкция *цикл* — $\langle \sigma, \alpha \rangle$, где σ — заголовок цикла, $\sigma = A_i(c_1^i, \dots, c_m^{i*}, \dots, c_n^i)$: *усл* (при этом c_m^{i*} назовем параметром цикла), α — тело цикла (составной оператор).

Выполнение цикла начинается с определения числа повторений цикла. При определении числа повторений цикла r возможны следующие варианты:

— в результатах ξ работы прикладной программы отношения с именем A_i пусто; в этом случае число повторений цикла $r = 0$;

— в результатах ξ работы прикладной программы отношение с именем A_i непусто; в этом случае число повторений цикла r зависит от ξ и состояния процесса формирования текста q_s . Здесь возможны два случая.

- Состояние процесса формирования текста $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$ таково, что вектор значений переменных A^s пуст ($Nm = 0$) или в векторе значений переменных A^s нет таких переменных nma_g, \dots, nma_h , что $nma_g = c_k^i, \dots, nma_h = c_p^i$, где $1 \leq p, k \leq n$. Тогда $r = \mu\{a_m | A_i(a_1, \dots, a_m, \dots, a_n) \in \xi\}$, где a_m — m -й элемент кортежа A_i , т. е. число повторений цикла равно мощности множества значений параметра цикла c_m^{i*} в результатах ξ работы прикладной программы.
- Состояние $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$ таково, что в векторе значений переменных A^s имеются переменные nma_g, \dots, nma_h такие, что $nma_g = c_k^i, \dots, nma_h = c_p^i$, где $1 \leq p, k \leq n$. В этом случае число выполнений цикла определяется по результа-

там ξ работы прикладной программы в соответствии со значениями переменных $nma_g = c_k^i, \dots,$

$nma_h = c_p^i$ из вектора A^s следующим образом.

Пусть в результатах ξ существуют кортежи $zn_q \in A_i, \dots, zn_r \in A_i$, такие что

$$\begin{aligned} zn_q[k] &= val_n^g, \dots, zn_q[p] = val_m^g, \\ &\dots \\ zn_r[k] &= val_n^h, \dots, zn_r[p] = val_m^h, \end{aligned} \tag{1}$$

где $zn[k]$ — элемент кортежа zn с номером k , $val_n^g, \dots, val_m^g \in VAL_g, val_n^h, \dots, val_m^h \in VAL_h$. Тогда $r = \mu\{zn_q[m], \dots, zn_r[m]\}$.

Если в результатах ξ нет таких значений, при которых выполняются условия (1), то $r = 0$.

Если $r = 0$, то выполнение цикла на этом заканчивается и формируется следующее состояние процесса порождения текста $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$, где $A^{s+1} = A^s$, $P^{s+1} = P^s$, $T^{s+1} = T^s$, N^{s+1} — позиционный номер конструкции, следующей за выполненным циклом в составном операторе.

Если $r \geq 1$, то дальнейшее выполнение цикла зависит от того, какая из перечисленных далее трех ситуаций имеет место:

— данный цикл не является вложенным в другие циклы;

— данный цикл является вложенным в тело некоторых других циклов, но на значения переменных в заголовке цикла никаких ограничений циклами или альтернативами, внешними по отношению к данному циклу, не наложено;

— на некоторые переменные отношения A_i были наложены ограничения внешними циклами либо альтернативами.

В работе [5] определено формирование очередного состояния в каждом случае. Рассмотрим для примера формирование очередного состояния в первом случае. Очередное состояние процесса порождения текста $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$. Здесь $A^{s+1} = A^s \oplus \langle a_{N_s+1}, \dots, a_{N_s+n} \rangle$, где $a_{N_s+1} = \langle nma_{N_s+1}, VAL_{N_s+1} \rangle, \dots, a_{N_s+n} = \langle nma_{N_s+n}, VAL_{N_s+n} \rangle, nma_{N_s+1} = c_1^i, \dots, nma_{N_s+n} = c_n^i$, результатом операции \oplus над векторами A^s и $\langle a_{N_s+1}, \dots, a_{N_s+n} \rangle$ является вектор $\langle a_1, \dots, a_s, a_{N_s+1}, \dots, a_{N_s+n} \rangle$. Каждой переменной $nma_{N_s+j}, j = 1, \dots, n$, сопоставляется множество ее значений VAL_{N_s+j} из результатов ξ . Вектор отношений цикла и альтерна-

тивы примет вид: $P^{s+1} = P^s \oplus \langle p_{Ks+1} \rangle$, причем $p_{Ks+1} = (p_{Ks+1}, nmv_{Ks+1}, Nc_{Ks+1}, Nqn_{Ks+1}, VALVC_{Ks+1})$, где $p_{Ks+1} = A_i$ — имя отношения в заголовке цикла; $nmv_{Ks+1} = c_m^{i*}$, где c_m^{i*} — имя переменной цикла; $Nc_{Ks+1} = r$ — число выполнений цикла; $Nqn_{Ks+1} = s$ — номер состояния до выполнения цикла; $VALVC_{Ks+1} = Y^{s+1}(c_m^{i*})$ — значение переменной цикла c_m^{i*} ; $T^{s+1} = T^s$; N^{s+1} — есть позиционный номер, следующий за номером N^s в лексикографическом порядке.

Далее r раз выполняется тело цикла. После завершения каждого выполнения тела цикла формируется новое состояние.

Наконец, рассмотрим последний случай, когда тело цикла уже выполнено r раз и получено состояние q_s . В этом случае состояние $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$ таково, что $p_{Ks} = A_i$ и $nmv_{Ks} = c_m^{i*}$. Тогда формируется новое состояние q_{s+1} следующим образом: $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$ такое, что $A^{s+1} = A^f$, $P^{s+1} = P^f$, где $f = Nqn_{Ks}$ — номер состояния вычислительного процесса до выполнения цикла, $T^{s+1} = T^s$, N^{s+1} — позиционный номер, следующий за номером N^s — в лексикографическом порядке.

Пусть выполняемым элементом описания текста w_i является выводимое множество — $\langle \gamma = A_i(c_1^i, \dots, c_m^{i*}, \dots, c_n^i) : усл \rangle$, т. е. γ — описание множества (при этом c_m^{i*} назовем выводимым элементом). Выполнение данной конструкции зависит от того, какая из перечисленных ниже ситуаций имеет место:

— в результатах ξ работы прикладной программы отношение, имя которого совпадает с именем отношения в описании выводимого множества, пусто;

— на значения переменных в описании выводимого множества никаких условий циклами и альтернативами, внешними по отношению к данной конструкции, не наложено;

— на значения некоторых переменных в описании выводимого множества наложены условия внешними циклами или альтернативами.

Если в выходных данных ξ прикладной программы нет отношения с именем A_p , то выполнение конструкции выводимое множество на этом заканчивается. При этом формируется следующее состояние процесса порождения текста $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1},$

$T^{s+1}, N^{s+1})$ такое, что $A^{s+1} = A^s$, $P^{s+1} = P^s$, $T^{s+1} = T^s$, N^{s+1} — позиционный номер конструкции, следующий за позиционным номером N^s в лексикографическом порядке.

Если на значения переменных в описании выводимого множества не наложено условий внешними циклами и альтернативами, то $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$ таково, что в векторе значений переменных A^s имеет место $nta_j \neq c_k^i$ для всех $1 \leq j \leq Nm$ и $1 \leq k \leq n$. В этом случае формируется очередное состояние процесса порождения текста $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$ такое, что $A^{s+1} = A^s$, $P^{s+1} = P^s$, $T^{s+1} = T^s + t$, где t — все значения переменной c_m^{i*} , разделенные запятой, из упорядоченного множества $M(c_m^{i*})$. Упорядоченное множество $M(c_m^{i*})$ формируется из множества значений переменной c_m^{i*} — всех m -х элементов кортежей с именем A_i из результатов ξ работы прикладной программы.

Если на значения некоторых переменных в описании выводимого множества наложены условия внешними циклами или альтернативами, то состояние процесса формирования текста $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$ таково, что в векторе значений переменных A^s имеются переменные nta_g, \dots, nta_h такие, что $nta_g = c_k^i, \dots, nta_h = c_p^i$, где $1 \leq p, k \leq n$ (некоторые переменные отношения A_i в описании выводимого множества совпадают с некоторыми переменными вектора значений переменных A^s). В этом случае формируется очередное состояние процесса порождения текста $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$ такое, что $A^{s+1} = A^s$, $P^{s+1} = P^s$, $T^{s+1} = T^s + t$, где t — все значения переменной c_m^{i*} , разделенные запятой, из упорядоченного множества $M(c_m^{i*})$. Упорядоченное множество $M(c_m^{i*})$ формируется из множества значений переменной c_m^{i*} , которое определяется по результатам ξ работы прикладной программы в соответствии со значениями переменных $nta_g = c_k^i, \dots, nta_h = c_p^i$, где $1 \leq p, k \leq n$ из вектора A^s .

Пусть выполняемым элементом описания текста w_i является конструкция альтернатива — $\langle \beta, \{\Omega_1, \dots, \Omega_m\} \rangle$, где β — описание переменной, т. е. $\beta = A_i(c_1^i, \dots, c_m^{i*}, \dots, c_n^i)$ (при этом c_m^{i*} назовем альтернативной переменной), $\{\Omega_1, \dots, \Omega_m\}$ — описания



альтернатив. Описание каждой альтернативы есть $\Omega_k = \langle \delta_k, \psi_k \rangle$, $1 \leq k \leq m$. Множество условий выбора есть $\delta_k = N$, где N — либо некоторое число, обозначающее возможное число значений альтернативной переменной, либо $\{\text{значение}_i\}$, где $i \geq 1$, т. е. заданное множество значений альтернативной переменной по выходным данным прикладной программы. Множеством условий выбора δ_k может быть также метка #, на которую произойдет переход, если не будет выполняться ни одно из заданных условий выбора, т. е. δ_m — либо число, либо $\{\text{значение}_i\}$, где $i \geq 1$ либо метка. Вариант ψ_k — это составной оператор, который будет выполняться, если значения переменной удовлетворяют условию выбора δ_k .

Выполнение альтернативы начинается с определения множества значений альтернативной переменной c_m^{i*} по описанию переменной, состоянию процесса порождения текста q_s и выходным данным ξ прикладной программы. Способ определения множества значений переменной c_m^{i*} совпадает со способом определения множества значений для конструкции *выводимое множество*.

Дальнейшее выполнение конструкции *альтернатива* зависит от условий выбора.

Пусть мощность множества значений альтернативной переменной c_m^{i*} либо совпадает с числом в одном из условий выбора, либо заданное подмножество значений в одном из условий выбора есть подмножество множества значений альтернативной переменной, либо если эти условия не выполняются, но последним условием выбора является метка. Тогда формирование очередного состояния процесса порождения зависит от способа определения значений альтернативной переменной c_m^{i*} . При этом в каждом из возможных случаев формируется очередное состояние.

Далее выполняется выбранный составной оператор, т. е. оператор ψ_k , условие выбора δ_k которого является первым по порядку условием выбора среди множества условий выбора, удовлетворяющих значению альтернативной переменной, иначе выполняется оператор ψ_m , если $\delta_m = \#$.

Пусть после выполнения выбранного составного оператора было получено состояние $q_s = (A^s, P^s, T^s, N^s)$. В этом случае формируется очередное состояние $q_{s+1} \leq (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$ такое, что $A^{s+1} = A^f$, $P^{s+1} = P^f$, где $f = Nqn_{k_s}$ — номер состояния вычислительного процесса до выполнения альтернативы, $T^{s+1} = T^s$, N^{s+1} — позицион-

ный номер конструкции, следующей за альтернативой в составном операторе.

Если ни одно из условий выбора не удовлетворяется и среди условий выбора нет условия выбора, совпадающего с меткой, то очередное состояние процесса формирования примет вид: $q_{s+1} = (A^{s+1}, P^{s+1}, T^{s+1}, N^{s+1})$, где $A^{s+1} = A^s$, $P^{s+1} = P^s$, $T^{s+1} = T^s$, N^{s+1} — позиционный номер конструкции, следующей за альтернативой в составном операторе.

3. МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ ПОДХОДА

Сформулируем сначала основные требования, которым должен удовлетворить генератор текстов:

- генератор текста должен иметь средства форматирования, которые не уступают по своим возможностям существующим средствам форматирования документов;
- выходные данные прикладной программы не должны ограничиваться форматом какой-либо реляционной базы данных; все широко известные и используемые форматы реляционных баз данных могут использоваться как средство хранения выходных данных прикладной программы;
- модель текста по универсальной онтологии должна формироваться с помощью редактора, помогающего разработчику без заучивания конструкций онтологии формировать конкретную модель текста.

Для реализации этих требований онтология расширена конструкциями оформления. Конструкции оформления — это конструкции (теги) одного из языков разметки, например, HTML, RTF. Выбор языка разметки зависит от требований к оформлению текста.

Прикладная программа записывает свои выходные данные в базу данных в соответствии с форматом, определенным в модели текста. База данных может находиться как в локальном компьютере, так и быть сетевой. Генератор текстов формирует текст на том языке разметки, вставки конструкций которого присутствуют в описании шаблона текста. На следующем этапе оно приводится к виду, понятному пользователю с помощью интерпретатора языка разметки (например, с помощью браузера, компонента HTMLView или интерпретатора RTF). На рис. 2 приведена обобщенная схема процесса формирования текста.

Метод создания модели текста заключается в следующем: с помощью редактора создается модель переменных прикладной программы (или повторно используется уже созданная), далее, с

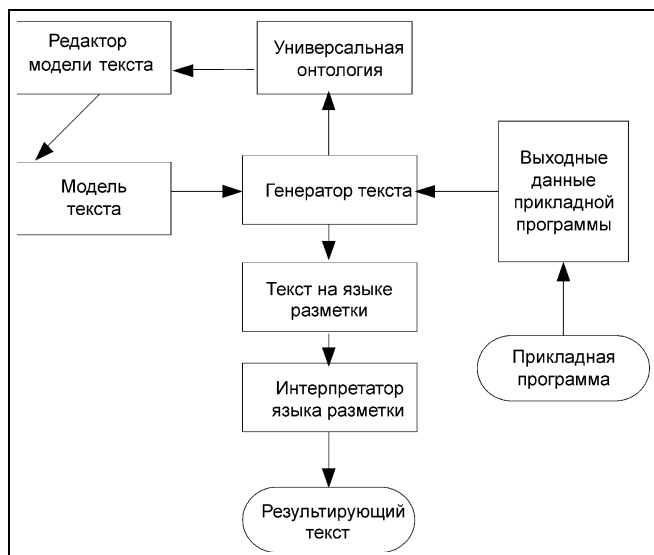


Рис. 2. Обобщенная схема формирования текста

помощью этого же редактора, создается модель структуры и содержания текста. С помощью редактора модели текста вставляются конструкции языка разметки для описания оформления текста либо эти конструкции вставляются в описание с помощью редактора языка разметки. Заметим, что редактор модели текста не имеет средств автоматизированного создания конструкций языка разметки, поскольку он не «привязан» к какому-либо конкретному языку разметки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены основная идея и метод реализации подхода к генерации текстов произвольной структуры и содержания. Тексты могут служить объяснениями результатов работы прикладной программы, отчетами и другими документами. Описание текста не встраивается в архитектурные компоненты программной системы — интерфейс и прикладную программу, а автоматически генерируется на основе модели текстов и результатов работы прикладной программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cohen R., Spencer B., Sanmugasunderam A. Providing responses specific to a user's goals and background // Int. J. Expert Systems. — 1989. — N 2. — P. 135—162.
2. Маклаков С. В. Анализ данных. Генератор отчетов Crystal Reports. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 489 с.
3. Бобровский С. Технология Пентагона на службе российских программистов. Программная инженерия. — СПб.: Питер, 2003. — 222 с.
4. Uschold M. Knowledge Level Modeling: Concepts and Terminology // The Knowledge Engineering Review. — 1998. — Vol. 13:1. — P. 5—29.
5. Грибова В. В., Клещев А. С. Модель вербального объяснения результатов работы экспертной системы для индивидуального пользователя // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2000. — № 3. — С. 155—160.

☎ (4232) 31-40-01

e-mail: gribova@iacp.dvo.ru



Новые книги

- Алгоритмы и S-модели гибридных систем адаптивного управления.** — Благовещенск: Амурск. гос. ун-т, 2005. — 204 с.
- Амбарцумян А.А.** Событийное логическое управление производственными процессами поточного типа. — М.: Ин-т проблем управления, 2006. — 99 с.
- Боголюбов Н.Н.** Собрание научных трудов. Т. 3. — М.: Наука, 2005. — 605 с.
- Нормальные формы и бифуркации векторных полей на плоскости.** — М.: МЦНМО, 2005. — 415 с.
- Винниченко И.В.** Автоматизация процессов тестирования. — СПб.: Питер, 2005. — 202 с.
- Воронин В.В.** Теоретические проблемы диагностических экспертных систем. — Владивосток: Дальнаука, 2005 с.
- Информационные технологии регионального управления.** — М.: УРСС, 2004. — 398 с.
- Малугин В.А.** Математика для экономистов. Линейная алгебра. — М.: Эксмо, 2006. — 216 с.
- Мао В.** Современная криптография. — М.: Вильямс, 2005. — 763 с.
- Мартюшев Л.М.** Развитие экосистем и современная термодинамика. — М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2004. — 78 с.
- Морозов А.Д.** Визуализация и анализ инвариантных множеств динамических систем. — М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2003. — 303 с.
- Нарышкин А.К.** Цифровые устройства и микропроцессоры. — М.: Academia, 2006. — 317 с.
- Нечепуренко М.И.** Итерации вещественных функций и функциональные уравнения. — Новосибирск, 2005. — 231 с.
- Новое в искусственном интеллекте.** — М.: Интелл, 2005. — 280 с.
- Петров М.К.** Философские проблемы "науки о науке". — М.: РОССПЭН, 2006. — 623 с.
- Пузанов В.П.** Критерии устойчивости линейных систем автоматического управления и регулирования. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 92 с.
- Реструктуризация экономики дотационного региона.** — М.: Экономика, 2005. — 663 с.
- Суздаев И.П.** Нанотехнология. — М.: URSS, 2006. — 589 с.
- Тархов Д.А.** Нейронные сети. — М.: Радиотехника, 2005. — 256 с.
- Турчин В.И.** Введение в современную теорию оценки параметров сигналов. — Н. Новгород, 2005. — 114 с.
- Фёдоров Ю.Н.** Основы построения АСУТП взрывоопасных производств. — М.: СИНТЕГ, 2006. — Т. 1. 710 с.; Т. 2. 620 с.
- Шаронов А.В.** Методы функционального анализа в теории систем автоматического управления. — М.: Горный ун-т, 2005. — 246 с.
- Экстремальная робототехника.** — СПб.: Астерион, 2004. — 436 с.

ЭКСПЕРТНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ СИТУАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ КОЛЛЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДОВ

В. М. Дорожко, А. Н. Лебедева

Дан анализ системы экспертных представлений о коллективном движении судов на основе технологии его разделения на базисные информационные конструкции, обладающие общностью и репрезентативностью характеристик. На примере движения двух, трех судов и караванов судопотока выполнен ситуационный анализ проблемы информационного обеспечения безопасности судоходства.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях морской транспорт является наиболее экономически эффективным по сравнению с другими видами транспорта. Например, для большинства стран Азиатско-тихоокеанского региона (АТР) — это единственное полноценное средство обеспечения грузооборота. В экономической зоне АТР сосредоточено свыше 20-ти крупнейших портов мира, обеспечение эффективной деятельности которых выдвигает ряд актуальных задач безопасности морского трафика. Огромные потоки судов создают на акваториях морских портов сложную динамическую картину пересекающихся судопотоков. Современные порты оборудованы системами управления движением судов (СУДС) [1, 2], которые совместно с судовыми автоматизированными системами сбора и обработки информации о навигационной обстановке являются основными элементами системы обеспечения безопасности судоходства. Бурный рост интенсивности судопотоков и соответственное возрастание нагрузки на операторов СУДС постоянно находятся в непреодолимом противоречии при решении задач безопасности судоходства на существующей информационно-технологической базе. Управление безопасностью морского трафика требует новых концепций создания СУДС, основанных на современных технологиях, в частности, на применении экспертных систем [3].

Создание экспертной системы в составе СУДС — сложный и многоплановый процесс, который неизбежно начинается с экспертного осмысления проблемы модельного представления о коллектив-

ном движении судов. Сложность предметной области подчеркивается как динамичностью и насыщенностью судопотоков, так и высокой степенью изменчивости качественного состава и числа участников движения.

В настоящей статье анализируется система экспертных представлений о коллективном движении судов на основе технологии разделения коллективного движения судов на базисные информационные конструкции, обладающие общностью и репрезентативностью характеристик.

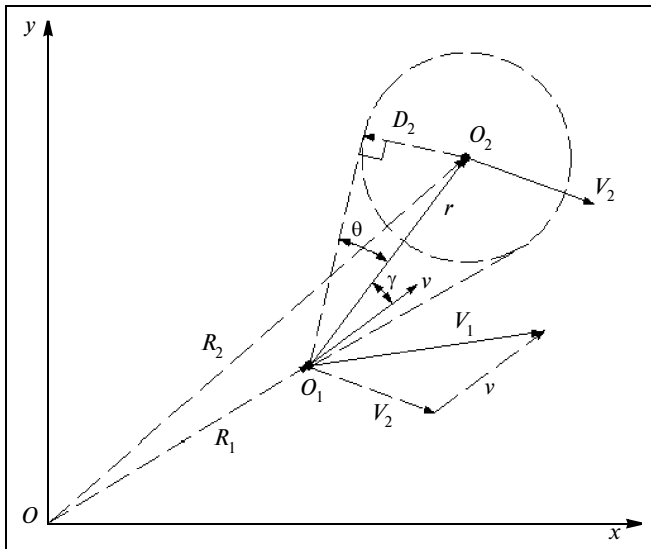
1. СОВМЕСТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ДВУХ СУДОВ

Пусть в системе координат $хоу$ движутся два судна (рис. 1) так, что центры приложения сил их движителей находятся в точках o_1 (первое судно) и o_2 (второе судно). Измеренные координаты судов описываются уравнениями $z_x^{(i)} = x^{(i)} + \xi_x$, $z_y^{(i)} = y^{(i)} + \xi_y$, где $z_x^{(i)}$ и $z_y^{(i)}$ — измеренные координаты судна по осям $ох$ и $оу$; ξ_x и ξ_y — случайные ошибки измерений, $i = 1, 2$ — порядковый номер судна в паре.

По измеренным значениям координат можно получить оценку вектора состояния коллективного движения двух судов [4]:

$$\hat{s} = (R_1, R_2, V_1, V_2, r, v, \theta, \gamma, \theta', \gamma'),$$

где R_1, R_2 и V_1, V_2 — положение и скорость 1-го и 2-го судов, соответственно; r и v — относительные расстояние и скорость между судами; θ и θ' — угол и его производная видимости радиуса D_2 зоны безопасности (домена) из точки o_1 ; γ и γ' — угол и его


Рис. 1. Диаграмма ситуационных моделей движения двух судов

производная отклонения вектора относительной скорости v от вектора расстояния r между судами.

Между собой углы θ , γ , их производные θ' , γ' и векторы r , v связаны выражениями

$$\theta = \arcsin \frac{D_2}{|r|}, \quad \gamma = \arccos \frac{r^T v}{|r||v|}$$

$$\theta' = -\frac{|v|}{|r|} \operatorname{tg} \theta \cos \gamma, \quad \gamma' = -\frac{|v|}{|r|} \sin \gamma + \frac{r^T v'}{|r||v|} + \frac{v^T v'}{|v|^2} \operatorname{ctg} \gamma,$$

где $r = R_2(t) - R_1(t)$, $v = V_1(t) - V_2(t)$, $r' = -v$.

Множество кинематических ситуаций совместного движения двух судов образуется сочетанием четырех величин θ , θ' , γ и γ' .

Рассмотрим первую группу ситуаций (1.1—1.8), характеризующуюся наивысшей степенью опасности (табл. 1, рис. 1 и 2), когда вектор относительной скорости v в начальный момент времени направлен на домен судна o_2 (здесь и далее обозначение судна будет отождествляться с обозначением точки приложения сил движителя). Домен представляет собой охранную зону вокруг судна, проникновение в которую других объектов недопустимо, так как оно может привести к столкновению.

Ситуации 1.1 и 1.2: $\theta > \gamma$, $\theta' > 0$, $\gamma' < 0$, $\gamma < \pi$.

Динамика изменения относительного расстояния и относительной скорости характеризуется сближением и коллинеаризацией векторов r и v . При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ сближение происходит быстрее коллинеаризации, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ коллинеаризация происходит быстрее сближения.

Ситуации 1.3 и 1.4: $\theta > \gamma$, $\theta' > 0$, $\gamma' > 0$, $\gamma < \pi$.

Динамика изменения расстояния r и скорости v характеризуется сближением и тенденцией к уклонению. При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ сближение происходит быстрее уклонения, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ уклонение происходит быстрее сближения. Для безопасного уклонения необходимо выполнить условие $\varepsilon = \tau/T < 1$, где $\tau = (\theta - \gamma)/(\theta' - \gamma')$ — время выхода направления относительной скорости v из домена судна o_2 ; $T = (|r| - D_2)/(r^T v/|r|)$ — время до касания судном o_1 домена судна o_2 .

Таблица 1

Ситуационные модели первой группы

Номер ситуации	Динамика относительного положения		Динамика относительной скорости		Маневрирование		Оценка ситуации при $ r \rightarrow D_1 + D_2$	
	сближение: $\theta' > 0$	удаление: $\theta' < 0$	коллинеаризация векторов r и v : $\gamma' < 0$	уклонение: $\gamma' > 0$	благодаря изменению дистанции: $ \gamma' / \theta' < 1$	благодаря изменению курсов: $ \gamma' / \theta' > 1$	уровень опасности	рекомендуемые способы расхождения
$\theta > \gamma$, $\gamma < \pi$. Вектор относительной скорости направлен на домен судна o_2								
1.1	+	−	+	−	+	−	аварийный	реверс скорости
1.2	+	−	+	−	−	+	то же	то же
1.3	+	−	−	+	+	−	− " −	циркуляция
1.4	+	−	−	+	−	+	− " −	то же
$\theta > (\gamma - \pi)$, $\gamma > \pi$. Вектор относительной скорости направлен в противоположную сторону от домена судна o_2								
1.5	−	+	+	−	+	−	безопасный	удаление $\theta' < 0$
1.6	−	+	+	−	−	+	то же	то же
1.7	−	+	−	+	+	−	− " −	− " −
1.8	−	+	−	+	−	+	− " −	− " −

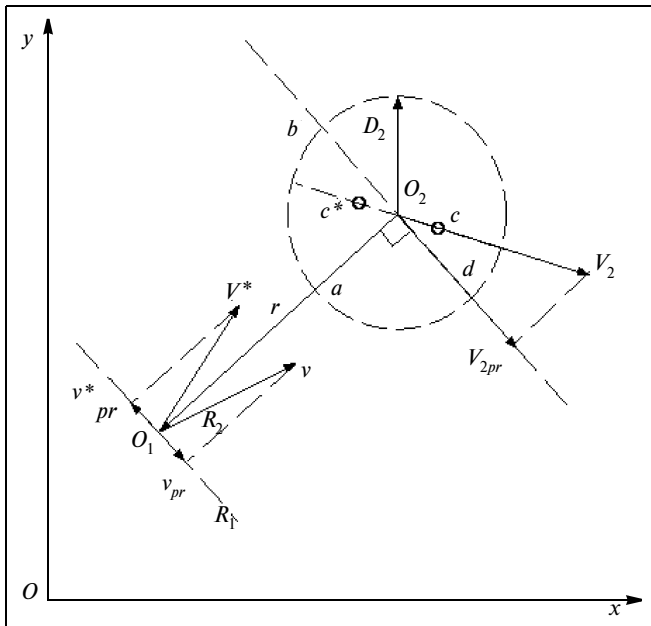


Рис. 2. Диаграмма моделирования классификационных признаков столкновения двух судов (вектор относительной скорости лежит на прямой, проходящей через домен встречного судна)

Для ситуаций 1.1—1.4 столкновение неизбежно, если $|r| < D_1 + D_2$; для $|r| > D_1 + D_2$ возможно вторжение судна o_1 в домен судна o_2 . При этом если проекции V_{2pr} и v_{pr} на перпендикуляр к вектору r имеют одинаковый знак и $|r| < D_1 + D_2$, то столкновение в ситуациях 1.1—1.4 произойдет одноименными частями корпусов судов («нос—нос» — в секторе дуги ad), в противном случае (проекции имеют разные знаки) — разноименными частями («нос—корма» — в секторе дуги ab) (см. рис. 2).

Для ситуаций 1.1 и 1.2 при $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ имеет место тенденция к касательному столкновению, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ — тенденция к центральному столкновению, а для ситуаций 1.3 и 1.4 при $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ — тенденция к центральному столкновению, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ — тенденция к касательному столкновению.

Центральное столкновение — смещение точки столкновения к точке o_2 (середина борта), касательное — смещение точки столкновения к точке $c(c^*)$ — нос (корма), соответственно.

Ситуации 1.5 и 1.6: $\theta > \gamma - \pi$, $\theta' < 0$, $\gamma' < 0$, $\gamma > \pi$.

Динамика изменения относительного расстояния и относительной скорости характеризуется удалением судов и коллинеаризацией векторов v и r . При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ удаление происходит быстрее коллинеаризации, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ коллинеаризация происходит быстрее удаления.

Ситуации 1.7 и 1.8: $\theta > \gamma - \pi$, $\theta' < 0$, $\gamma' > 0$, $\gamma > \pi$.

Динамика изменения расстояния r и скорости v характеризуется удалением и уклонением судов от

коллинеаризации движения. При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ удаление происходит быстрее уклонения, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ уклонение происходит быстрее удаления.

В ситуациях (1.5—1.8) столкновение судов исключено. Расхождение происходит при увеличении (ситуации 1.5 и 1.6) или уменьшении (ситуации 1.7 и 1.8) коллинеарности векторов скорости v и расстояния r . Ситуации 1.5, 1.6 и 1.7, 1.8 могут рассматриваться как фазы расхождения реверсом скорости в ситуациях 1.1, 1.2 и 1.3, 1.4, соответственно.

Рассмотрим вторую группу (2.1—2.8) менее опасных ситуаций (табл. 2, рис. 1 и 3), когда в начальный момент времени вектор относительной скорости v не направлен на домен судна.

Ситуации 2.1 и 2.2: $\theta < \gamma$, $\theta' > 0$, $\gamma' < 0$, $\gamma < \pi$.

Динамика изменения относительного расстояния и относительной скорости характеризуется сближением и коллинеаризацией векторов r и v . При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ сближение происходит быстрее коллинеаризации, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ коллинеаризация происходит быстрее сближения.

Ситуации 2.3 и 2.4: $\theta < \gamma$, $\theta' > 0$, $\gamma' > 0$, $\gamma < \pi$.

Динамика изменения расстояния r и скорости v характеризуется сближением и уклонением судов. При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ сближение происходит быстрее уклонения, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ уклонение происходит быстрее сближения.

В ситуациях 2.1—2.4 при $|r| < D_1 + D_2$ возможно опасное сближение судов, при $|r| \rightarrow D_1 + D_2$ возможно касание доменов судов. Если проекции V_{2pr}

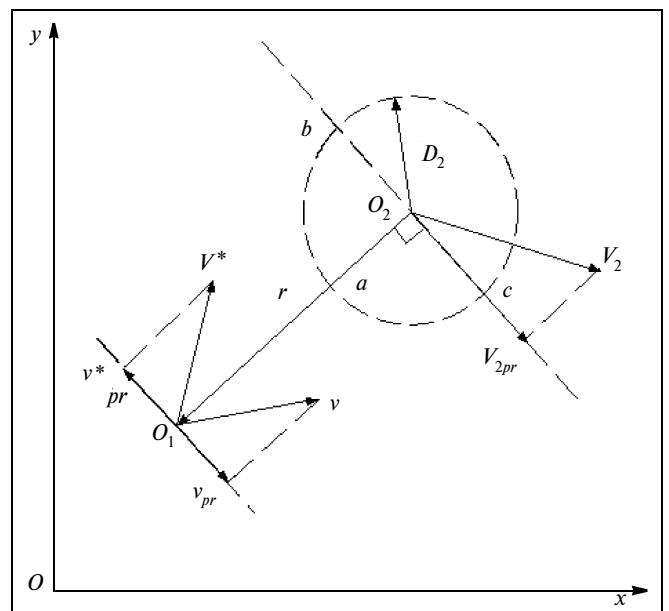


Рис. 3. Диаграмма моделирования классификационных признаков столкновения двух судов (вектор относительной скорости лежит на прямой, не проходящей через домен встречного судна)

и v_{pr} на перпендикуляр к вектору r имеют одинаковый знак (см. рис. 3), то касание доменов в ситуациях 2.1—2.4 может произойти одноименными частями корпусов судов («нос—нос» — в секторе дуги ac), в противном случае (проекции имеют разные знаки) — касание доменов может произойти разноименными частями («нос — корма» — в секторе дуги ab). Для ситуаций 2.1 и 2.2 при $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ имеет место тенденция к касательному касанию домена, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ — тенденция к центральному касанию домена. Для ситуаций 2.3 и 2.4, если $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ или $|\gamma'|/|\theta'| > 1$, то имеет место тенденция к касательному касанию домена. Центральное касание — смещение вектора относительной скорости v к точке a , касательное — к точке $b(c)$.

Ситуации 2.5 и 2.6: $\theta < \gamma - \pi$, $\theta' < 0$, $\gamma' < 0$, $\gamma > \pi$.

Динамика изменения относительного расстояния и относительной скорости характеризуется удалением судов и коллинеаризацией векторов v и r . При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ удаление происходит быстрее коллинеаризации, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ коллинеаризация происходит быстрее удаления.

Ситуации 2.7 и 2.8: $\theta < \gamma - \pi$, $\theta' < 0$, $\gamma' > 0$, $\gamma > \pi$.

Динамика изменения расстояния r и скорости v характеризуется удалением и уклонением судов от коллинеаризации векторов v и r . При $|\gamma'|/|\theta'| < 1$ удаление происходит быстрее уклонения, при $|\gamma'|/|\theta'| > 1$ уклонение происходит быстрее удаления.

В ситуациях 2.5—2.8 столкновение судов исключено. Движение характеризуется расхождением судов, которое происходит при увеличении (си-

туации 2.5 и 2.6) или уменьшении (situации 2.7 и 2.8) коллинеарности векторов скорости v и расстояния r . Ситуации 2.5, 2.6 и 2.7, 2.8 могут рассматриваться как фазы расхождения реверсом скорости в ситуациях 2.1, 2.2 и 2.3, 2.4, соответственно.

Оценим размеры домена. Различают два типа доменов: статические (размеры доменов неизменны) и динамические (размеры доменов зависят от кинематической ситуации) [4]. Рассмотрим технологию определения домена динамического типа. Воспользуемся аксиомой: если маневрирование судов ведет к опасному сближению, то выбранный радиус D домена должен позволить судну с учетом реакции и динамических качеств его движителя уклониться от столкновения путем маневра курсом и (или) скоростью.

Для оценки размера домена рассмотрим аварийную ситуацию (рис. 4), когда суда идут навстречу друг другу, т. е. векторы r , v и V_1 , V_2 коллинеарны.

Сначала рассмотрим реверс скорости (включение заднего хода каждым судном при максимальной мощности их движителей) как один из способов маневрирования в аварийных ситуациях. В этом случае длину выбега судна L_i [5] (где $i = 1, 2$ — номер судна) до полной остановки при реверсе скорости можно принять за определение радиуса домена D_i .

Другим способом маневрирования в аварийной ситуации является циркуляция — изменение курса судна с максимальной угловой скоростью. При расхождении судна o_1 циркуляцией (рис. 4 иллю-

Таблица 2

Ситуационные модели второй группы

Номер ситуации	Динамика относительного положения		Динамика относительной скорости		Маневрирование		Оценка ситуации при $ r \rightarrow D_1 + D_2$	
	сближение: $\theta' > 0$	удаление: $\theta' < 0$	коллинеаризация векторов r и v : $\gamma' < 0$	уклонение: $\gamma' > 0$	благодаря изменению дистанции: $ \gamma' / \theta' < 1$	благодаря изменению скоростей: $ \gamma' / \theta' > 1$	уровень опасности	рекомендуемые способы расхождения
$\theta < \gamma$, $\gamma < \pi$. Вектор относительной скорости направлен на домен судна o_2								
2.1	+	—	+	—	+	—	очень опасный	реверс скорости
2.2	+	—	+	—	—	+	то же	то же
2.3	+	—	—	+	+	—	опасный	циркуляция
2.4	+	—	—	+	—	+	то же	то же
$\theta < (\gamma - \pi)$, $\gamma > \pi$. Вектор относительной скорости направлен в противоположную сторону от домена судна o_2								
2.5	—	+	+	—	+	—	безопасный	удаление $\theta' < 0$
2.6	—	+	+	—	—	+	то же	то же
2.7	—	+	—	+	+	—	— " —	— " —
2.8	—	+	—	+	—	+	— " —	— " —

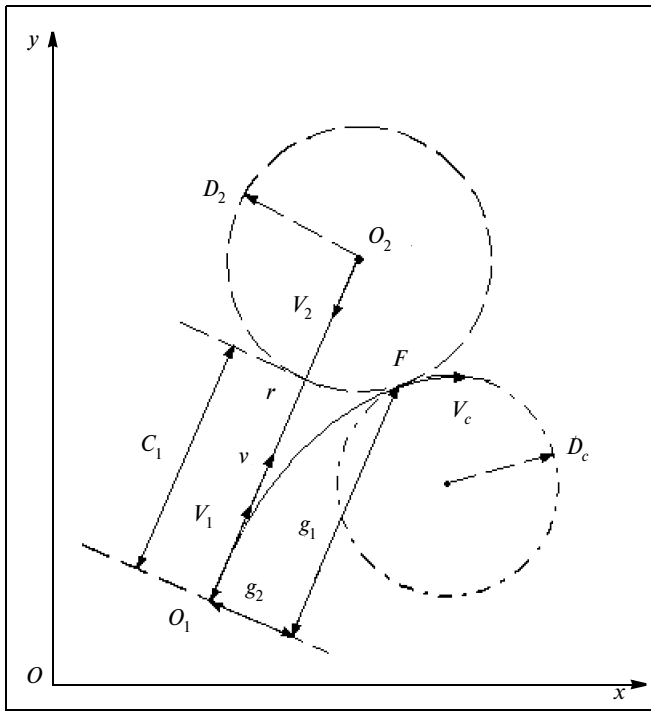


Рис. 4. Диаграмма расхождения судов циркуляцией

стрирует положение судов в конечный момент расхождения циркуляцией) за радиус домена примем расстояние $D_1 = \Delta r + C_1$, при котором исключается вторжение циркулирующего судна в зону безопасности судна-помехи o_2 , где Δr — расстояние, которое проходит судно o_2 за время циркуляции судна o_1 ; $C_1 = f(g_1, g_2)$ — минимально допустимое расстояние от судна o_1 до границы домена судна o_2 ; $g_1 = k_{c1}D_c$, $g_2 = k_{c2}D_c$. Коэффициенты k_{c1} и k_{c2} лежат в пределах $0,6 \dots 1,2$ и $0,5 \dots 0,6$, соответственно [6]. Конкретные значения коэффициентов k_{c1} , k_{c2} и радиуса циркуляции D_c выбираются из формуляра маневренных характеристик судна для максимального значения скорости V_c судна на циркуляции.

Ранее отмечалось, что суда отождествляются с точкой приложения сил движителей. С учетом реальных размеров судов, оценку которых можно получить одновременно с наблюдениями за положением судов, радиус домена i -го судна составит $D_i^* = D_i + L_{ki}/2$, где L_{ki} — длина судна.

Таким образом, минимально допустимое безопасное расстояние между двумя сближающимися судами зависит от скоростей судов, их размеров, динамических характеристик движителей, выбранного способа расхождения и составляет

$$r_{\min} = D_1^* + D_2^*.$$

2. КОЛЛЕКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ СУДОВ

Учитывая изложенные выше оценки ситуаций, рассмотрим случай коллективного движения сначала на примере расхождения трех судов с координатами приложения сил движителей в точках o_p , o_j и o_k (рис. 5), а затем распространим полученные выводы на случай совместного плавания n судов.

Определим угловой сектор, в пределах которого недопустим выбор курсов движения i -го судна, если известны положения и скорости j -го и k -го судов.

Сначала рассмотрим решение задачи расхождения i -го и j -го судов для наиболее опасного случая, когда предполагается возможность движения i -го судна с максимальной скоростью $V_{i\max}$. Тогда, смещая параллельно вектор скорости V_j (векторы 3 и 4) вплоть до касания одним его концом окружности $V_{i\max}$, а другим — касательных H_1 и H_2 к домену с радиусом D_j , получим два вектора относительных скоростей v_{ij} (5 и 6), лежащих на касательных H_1 и H_2 и соответствующих скоростям i -го судна V_i (7 и 8). Отсюда следует, что при максимальной скорости движения недопустим выбор курсов i -го судна в секторе между векторами 7 и 8. Вполне реальна ситуация, когда скорость v_{ij} уменьшается, рассмотрим предельный случай $v_{ij} \rightarrow 0$. Это может произойти, когда $V_j \rightarrow V_{i\max}$, а векторы V_i (7 и 8) поворачиваются от своего первоначального положения и стремятся к положению вектора 9. Таким образом, множество недопустимых курсов i -го судна расширяется на угол, образуемый вектора-

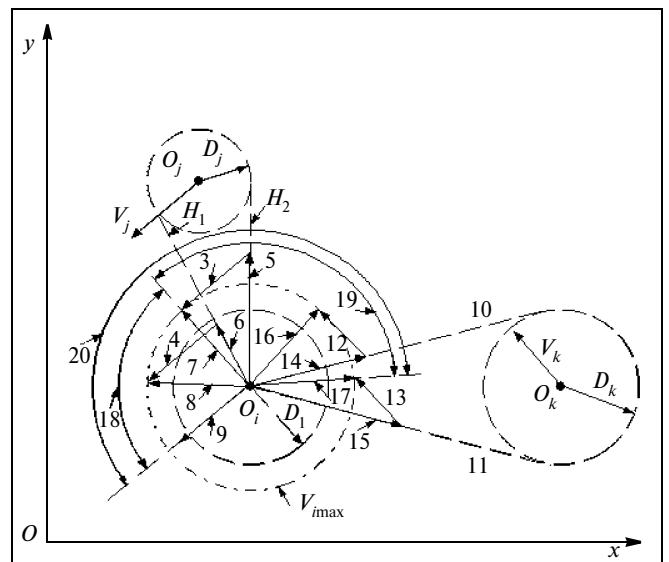


Рис. 5. Диаграмма ситуационных моделей движения трех судов

ми 8 и 9. В целом недопустимые курсы i -го судна лежат в секторе 18.

Рассматривая аналогично расхождение i -го и k -го судов, отметим, что вектор скорости V_k , будучи смещенным параллельно (векторы 12 и 13), определяет (для максимальной скорости V_{imax} i -го судна) векторы относительных скоростей v_{ik} (14 и 15), соответствующие случаям касания i -м судном домена судна o_k слева (касательная 10) и справа (касательная 11). Отсюда следует, что при максимальной скорости движения V_{imax} недопустим выбор курсов i -го судна в секторе между векторами 16 и 17. При выборе меньшей скорости v_{ik} (вплоть до близкой к нулю) векторы 16 и 17 поворачиваются от своего первоначального положения и стремятся по направлению к вектору V_k (в данном случае его направление совпадает с вектором 7).

Таким образом, множество недопустимых курсов i -го судна при его расхождении с k -м судном расширяется и заключается в секторе 19 между векторами 7 и 17.

Логически объединяя запрещенные сектора, получим, что при движении трех судов выбор курсов i -м судном в пределах сектора 20 недопустим.

Запишем полученные выводы в аналитической форме на примере расхождения i -го и j -го судов. Векторы относительной скорости между i -м и j -м судами определим из выражения

$$v_{ij}^{(q)} = V_{imax}^{(q)} - V_j, \quad q = 1, 2, \quad (1)$$

где $q = 1$ соответствует случаю, когда $v_{ij}^{(1)} \parallel H_1$; $q = 2$, если $v_{ij}^{(2)} \parallel H_2$.

Определив из выражения (1) векторы $V_{imax}^{(q)}$, запишем выражение для множества запрещенных курсов i -го судна при его расхождении с j -м судном:

$$\beta_{ij} = \max(\beta_{ij}^{(1)}, \beta_{ij}^{(2)}),$$

где $\beta_{ij}^{(q)} = \text{angle}(V_j, V_{imax}^{(q)})$ — множество запрещенных курсов i -го судна в секторе, образованном вектором V_j и вектором $V_{imax}^{(q)}$.

Полученные результаты могут быть легко распространены на случай коллективного движения n судов. Сектор множества углов, в пределах которого запрещен выбор курсов i -го судна, определится в результате объединения множества углов β_{ij} :

$$\beta_i = \bigcup_{j=1}^n \beta_{ij}, \quad i \neq j.$$

3. КОЛЛЕКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ В СУДОПОТОКЕ

Пересекающийся сужающийся судопоток является классическим случаем неупорядоченного движения судов при их подходе с различных морских трасс к портовым фарватерам. Рассмотрим караван судов (элемент судопотока) как базисную информационную конструкцию совместного плавания множества судов на примере пересечения двух судопотоков A и B (рис. 6), условно разделенных на караваны A_1 — A_3 и B_1 — B_3 , соответственно. Каждый караван характеризуется преимущественно последовательным движением судов. Стрелками условно обозначены векторы скоростей судов на некоторый момент времени. Оговоримся, что на рис. 6 представлена ситуация для гипотетического случая, когда со стороны СУДС отсутствует управление судопотоками.

Обозначим через α значение угла между осью ox и вектором среднего направления движения в судопотоке. Очевидно, что $\alpha(B_3) < \dots < \alpha(B_1) < \alpha(A_3) < \dots < \alpha(A_1)$, т. е. суда в караване A_2 , как имеющие судно-помеху справа, должны уступать дорогу судам в караване A_1 [7]. В свою очередь суда в караване A_3 должны уступать дорогу судам в караванах A_1 , A_2 и т. д. В связи с этим возникает коллизия: с одной стороны, ранее полученные ситуационные оценки безопасности совместного плавания двух, трех или множества судов справедливы также для оценки безопасности судов и в судопотоке, с другой — применить в судопотоке полученные рекомендации по расхождению не представляется возможным, так как свободой маневра для расхождения обладают суда только в караванах A_1 и B_3 . Формально уместные в случае совместного

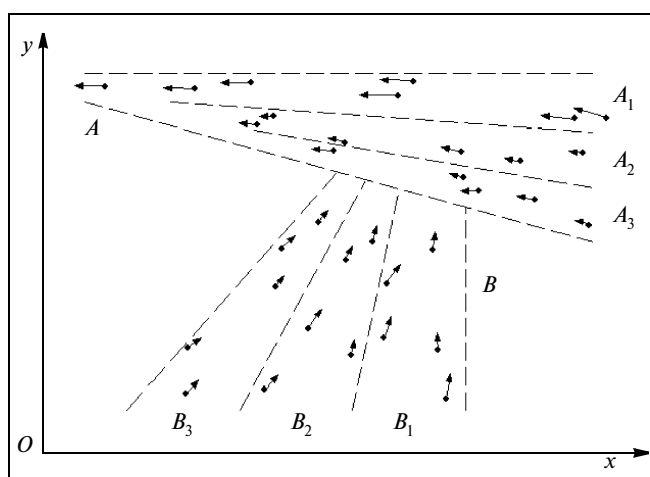


Рис. 6. Диаграмма коллективного движения судов (пересечение двух судопотоков)



движением двух или трех судов индивидуальные управляющие воздействия в рассматриваемом случае могут привести к распространению в судопотоке хаоса и неустойчивого возмущения.

Очевидно, что управление в данном случае должно строиться применительно к составным частям судопотока с таким расчетом, чтобы минимизировать не только уровень опасности столкновения, но и экономические потери от дезорганизации движения и простоя судов.

Согласно этому критерию управляющее воздействие СУДС должно привести к заблаговременной деформации потоков A и B путем перестройки и организации движения судов с таким расчетом, чтобы параллельное движение караванов в судопотоках было преобразовано в последовательное.

Для реализации подобной технологии область акватории, контролируемая СУДС, должна охватывать зоны на удалениях до $L = \sum_i l_i$, где l_i — длина i -го каравана.

Подобное преобразование обеспечивает непрерывное и последовательное движение судов в порядке очередности сначала в караванах A_1 , A_2 и A_3 , а затем — последовательное движение судов в порядке очередности в караванах B_1 , B_2 и B_3 .

Таким образом, выделение в судопотоке каравана как базисной информационной конструкции коллективного движения позволяет рассматривать его в качестве объекта управления судопотоками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье рассмотрена парадигма движения двух, трех и множества судов, а также элементов реструктуризации пересекающихся судопотоков как основных информационных базисных конструкций коллективного движения судов. Сформулировано определение домена как пространства вокруг судна, размеры которого позволяют благодаря экстренному маневру избежать

столкновения с помехой. Показано, что многообразие всех ситуаций для парного плавания исчерпывается анализом положений и векторных соотношений скоростей судов. На модели совместного плавания трех судов проиллюстрирована ситуация, когда единственным маневром для судна, имеющим судно-помеху справа, является пересечение курса помехи по ее корме. Полученные результаты распространены на случай расхождения множества судов. Для обеспечения безопасности коллективного плавания судов в судопотоке предложена схема преобразования параллельного движения судов в последовательное движение караванов.

Авторы выражают благодарность за постановку задачи и обсуждение результатов заведующему лабораторией управления и навигации ИАПУ ДВО РАН д-ру техн. наук А.С. Девятисильному.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскин А. С., Москвин Г. И. Береговые системы управления движением судов. — М.: Транспорт, 1986. — 159 с.
2. Погосов С. Г. Безопасность плавания в портовых водах. — М.: Транспорт, 1977. — 136 с.
3. Построение экспертных систем / Под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. — М.: Мир, 1987. — 441 с.
4. Система экспертных оценок состояния безопасности на морских акваториях / А. С. Девятисильный, В. М. Дорожко, В. М. Гриняк и др. // Информационные технологии. — 2004. — № 11. — С. 48—53.
5. Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 768 с.
6. Справочник по теории корабля. Т. 3. Управляемость водозмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / Под ред. Я. И. Войткунского. — Там же, 1985. — 544 с.
7. Международные правила предупреждения столкновения судов в море, 1972 (МППСС-72). — М.: Росконсульт, 2004. — 80 с.

☎ (4232) 31-35-49

e-mail: bendor@iacp.dvo.ru



Новая книга

Информационная безопасность систем организационного управления. Теоретические основы. В 2 т. / Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба, Е.А. Микрин и др. [отв. ред. Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба]. Ин-т проблем передачи информ. РАН. — М.: Наука, 2006.

Рассмотрены следующие вопросы: информационная безопасность в системах организационного управления на законодательном и организационном уровнях, информационная безопасность и информационное управление, методы защиты информации от несанкционированного доступа, обеспечение достоверности и сохранности информации. Цель книги — обзор, классификация и анализ уже имеющихся в этих областях теоретических разработок, ознакомление специалистов с новыми методами и способами защиты информации на ее различных уровнях, рекомендации в области обеспечения информационной безопасности.

Для научных работников и специалистов по информационной безопасности.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ ОРБИТ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ

А. С. Девятисильный, Д. Е. Кислов

Предложен метод численной оценки разрешимости задачи наблюдения в условиях конечной точности модельных представлений, обусловленной погружением задачи в вычислительную среду. Представлены результаты численного эксперимента, иллюстрирующие эффективность метода.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших задач, возникающих при управлении движением искусственных спутников Земли (ИСЗ), состоит в определении параметров их орбит по измерениям [1]. Ее решение может быть значительно затруднено при численной реализации [2]. Например, для класса ИСЗ, находящихся на околостационных орбитах (именно этот класс находится здесь в центре внимания), при использовании в качестве измерительной дальноточной информации от одного пункта наблюдения число обусловленности оператора связи «состояние—измерение» при конечномерном представлении задачи (в малом) составляет 10^7 – 10^9 и более. В связи с этим даже незначительные погрешности в задании элементов модели задачи, являющиеся, например, результатом конечности представления чисел в вычислительной машине, могут приводить к потере устойчивости ее решения.

В работе [2] приведены условия, гарантирующие численную разрешимость задач подобного рода, но не учтены возмущения операторов при погружении их в вычислительную среду. В настоящей статье этот пробел восполняется и в рамках концепции надежных вычислений (verified computing) и формулируются модифицированные условия.

Предложенная в работе технология численного анализа и результаты являются достаточно общими и могут быть применены для оценки корректности математической постановки задач, отличных от задач определения орбит.

1. МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Как и в работе [2], будем рассматривать модель обратной задачи (в малом) в следующем общем виде:

$$\delta \dot{x} = A(t)\delta x, \quad (1)$$

$$\delta z(t_k) = H(t_k)\delta x(t_k) + \zeta_k, \quad k = \overline{1, N},$$

где первое уравнение представляет эволюцию первой вариации (δx) вектора параметров орбиты, второе — вектор невязки измерений $\delta z(t_k)$, производимых в произвольные моменты времени t_k , $k = \overline{1, N}$; $A(t)$ и $H(t_k)$ — матрицы коэффициентов, получаемые при линеаризации нелинейной обратной задачи; ζ_k , $k = \overline{1, N}$ — инструментальные погрешности измерений.

Осуществляя переход в уравнениях измерений к значениям параметров состояния системы в некоторый момент времени t_0 , получим следующую эквивалентную задачу:

$$\delta z(t_k) = H(t_k)\Phi(t_k, t_0)\delta x(t_0) + \zeta_k, \quad k = \overline{1, N},$$

где $\Phi(t_k, t_0)$ — переходная матрица линейной динамической системы (1).

Переходя к записи в матричной форме, получим:

$$\delta z = L\delta x_0 + \zeta, \quad (2)$$

где $\delta x_0 = \delta x(t_0)$; $\delta z = (\delta z(t_1)^T, \delta z(t_2)^T, \dots, \delta z(t_N)^T)^T$ — вектор невязок измерений; ζ — соответствующий



вектор инструментальных погрешностей; L — матрица, структура которой очевидна.

Для построения оценок введем предположения относительно точности численных алгоритмов, участвующих в вычислении на ЭВМ матриц Φ и H . Будем полагать, что матрицы H_M и Φ_M , находящиеся в памяти ЭВМ, и точные матрицы H и Φ связаны следующими неравенствами:

$$\|H_M - H\|_F \leq \varepsilon_H \|H\|_F, \quad \|\Phi_M - \Phi\|_F \leq \varepsilon_\Phi \|\Phi\|_F, \quad (3)$$

где $\|\cdot\|_F$ — евклидова (фробениусова) норма матрицы [3].

Параметры ε_H и ε_Φ определяются вычислительной точностью используемых алгоритмов при построении матриц H_M и Φ_M . В описанных далее вычислительных экспериментах эти параметры составляют величины порядка 10^{-12} .

2. АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Построение оценки вычислительных погрешностей, накапливаемых при численном конструировании оператора L , сопряжено с построением оценок для его составляющих блоков $L_k = H(t_k)\Phi(t_k, t_0)$. Для построения последних рассмотрим следующее неравенство [3]:

$$\begin{aligned} \|(H_M \Phi_M)_M - H_M \Phi_M\|_F &\leq m\varepsilon_1 / (1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1)) \times \\ &\times \|H_M\|_F \|\Phi_M\|_F + m\varepsilon_0 / (1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1)) \cong \\ &\cong m\varepsilon_1 / (1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1)) \|H_M\|_F \|\Phi_M\|_F, \end{aligned} \quad (4)$$

где $m = \dim(\delta x)$; ε_1 — относительная точность представления вещественных чисел в ЭВМ (согласно общепринятому определению [3]); ε_0 — наименьшее положительное машинное число, отличное от нуля; $(H_M \Phi_M)_M$ — результат вычислений произведения $(H_M \Phi_M)_M$ на ЭВМ.

Как правило, разрядные сетки ЭВМ, используемые в практических расчетах, имеют крайне малое значение параметра ε_0 . Так, например, в режиме удвоенной точности представления вещественных чисел параметры ε_1 и ε_0 составляют величины порядка $2,2 \cdot 10^{-16}$ и $2,2 \cdot 10^{-308}$, соответственно, [3]. Поэтому, будем полагать, что абсолютным вкладом, а именно величиной $m\varepsilon_0 / (1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1))$ в оценке (4) можно пренебречь.

Далее, опираясь на неравенства

$$\begin{aligned} \|H\Phi\|_F &\geq \inf_{x \neq 0} \|\Phi_x\| / \|x\| \cdot \|H\|_F, \\ \|H\Phi\|_F &\geq \inf_{x \neq 0} \|H_x\| / \|x\| \cdot \|\Phi\|_F, \end{aligned} \quad (5)$$

с учетом предположений (3), получим следующую оценку:

$$\begin{aligned} &(\|(H_M \Phi_M)_M - H\Phi\|_F) / \|H\Phi\|_F \leq \\ &\leq \min(\sqrt{m} \mu(\Phi), \sqrt{\min(m, s)} \mu(H)) (1 + \varepsilon_H) \times \\ &\times (1 + \varepsilon_\Phi) m \varepsilon_1 / (1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1)) + \\ &+ (1 + \varepsilon_H) \varepsilon_\Phi + \varepsilon_H, \end{aligned} \quad (6)$$

где $s: \dim H = s \times m$; $\mu(A) = \sup_{\|x\|, \|y\| \neq 0} \frac{\|Ax\|}{\|x\|} \cdot \frac{\|y\|}{\|Ay\|}$ — число обусловленности оператора A .

Отметим, что при решении задач определения околостационарных орбит по дальномерным измерениям от одного наземного пункта, как показывают вычислительные эксперименты, $\mu(\Phi) \approx 10^9 - 10^{11}$. Данное обстоятельство может вести к чрезмерному завышению оценок вычислительных погрешностей, получаемых по формуле (6).

Для улучшения аналитической оценки (6), необходимо отказаться от грубых неравенств (5) и попытаться использовать результат вычислений $(H_M \Phi_M)_M$, полученный на ЭВМ. Поэтому оценим величины $\|H\|_F$, $\|\Phi\|_F$ и $\|H\Phi\|_F$, через полученные в результате вычислений на ЭВМ величины $\|H_M\|_F^M$, $\|\Phi_M\|_F^M$ и $\|(H_M \Phi_M)_M\|_F^M$, где $\|\cdot\|_F^M$ — результат вычислений фробениусовой нормы матрицы на ЭВМ.

Заметим, что для произвольной матрицы A_M , элементы которой являются машинными числами, вычисление нормы $\|A_M\|_F^M$ ($\dim A_M = p \times q$) сводится к вычислению нормы $\|a\|$, где a — некоторый вектор, составленный из элементов матрицы A_M . Если для вычисления нормы $\|a\|$ применить алгоритм вида:

Шаг 1. Вычисление $\|a\|^2$, следуя рекуррентной процедуре $S_0 = 0, S_k = S_{k-1} + a_k^2$; a_k — компоненты вектора a ; $k = \overline{1, pq}$.

Шаг 2. Вычисление $\|A_M\|_F^M = \sqrt{\|a\|^2}$, то справедлива оценка [3]:

$$\|A_M\|_F - \|A_M\|_F^M \leq R(p, q) \|A_M\|_F \leq \frac{R(p, q)}{1 - R(p, q)} \|A_M\|_F^M, \quad (7)$$

$$R(p, q) = \left(1 + \frac{pq\varepsilon_1}{2 + (1 - pq)\varepsilon_1}\right) \varepsilon_1 + \frac{pq\varepsilon_1}{2 + (1 - pq)\varepsilon_1},$$

где $\|A_M\|_F^M$ — вычисленное в соответствии с приведенным алгоритмом значение $\sqrt{\|a\|^2}$; $R(p, q) < 1$ — условие на значения p и q .

В соответствии с предположениями (3) получим оценку:

$$\frac{\|(H_M \Phi_M)_M - H\Phi\|_F}{\|H\Phi\|_F} \leq W \frac{\|H\|_F \|\Phi\|_F}{\|H\Phi\|_F} \leq \frac{W \|H_M\|_F \|\Phi_M\|_F}{(1 - \varepsilon_H)(1 - \varepsilon_\Phi) \|(H_M \Phi_M)_M\|_F - W \|H_M\|_F \|\Phi_M\|_F},$$

где $W = \frac{(1 + \varepsilon_H)(1 + \varepsilon_\Phi)m\varepsilon_1}{1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1)} + (1 + \varepsilon_H)\varepsilon_\Phi + \varepsilon_H$.

Далее, учитывая выражения (7), получим:

$$\frac{\|(H_M \Phi_M)_M - H\Phi\|_F}{\|H\Phi\|_F} \leq \frac{W \|H_M\|_F^M \|\Phi_M\|_F^M}{S \|(H_M \Phi_M)_M\|_F^M - W \|H_M\|_F^M \|\Phi_M\|_F^M}, \quad (8)$$

где $S = (1 - 2R(m, s))(1 - R(m, m))(1 - \varepsilon_H)(1 - \varepsilon_\Phi)$.

Поскольку константы, определяющие разрядную сетку ЭВМ, достаточно малы, и малы значения ε_H и ε_Φ , превосходство последней численно-аналитической оценки (8) перед оценкой (6) определяется по сути соотношением между величинами $\sqrt{m}\mu(\Phi)$ и $\|H_M\|_F^M \|\Phi_M\|_F^M (\|(H_M \Phi_M)_M\|_F^M)^{-1}$.

Важно отметить также ряд ограничений, выполнение которых необходимо для возможности применения формулы (8). Наиболее обременительное из них $S \|(H_M \Phi_M)_M\|_F > W \|H_M\|_F \|\Phi_M\|_F$. Остальные в рамках используемой вычислительной точности весьма несущественны и могут быть представлены следующими неравенствами: $R(m, s) < 0,5$, $R(m, m) < 1$, $\varepsilon_H < 1$, $\varepsilon_\Phi < 1$.

3. УСЛОВИЯ РАЗРЕШИМОСТИ

Покажем, как на основе описанного выше подхода к оцениванию вычислительных погрешностей возможно исследование принципиальной разрешимости исходной линейной задачи (1). Естественным условием принципиальной разрешимости последней является отличие от нуля минимального сингулярного числа оператора L , входящего в уравнение (2). Однако, непосредственно, такой оператор неизвестен, поэтому заключение о полноте его ранга придется делать, исходя из знания численно полученного оператора L_M и оценки возмущений $\|L - L_M\|$.

Как уже отмечалось выше, оператор L состоит из блоков $H\Phi$. Зная оценки погрешностей вычисления таких блоков, не составит труда получить

оценку относительной погрешности для возмущенного оператора L_M .

$$\frac{\|L - L_M\|}{\|L\|} \leq P \sqrt{\min(sN, m)},$$

где $P = \max_i \frac{W \|H_M\|_F^M \|\Phi_M\|_F^M}{S \|(H_M \Phi_M)_M\|_F^M - W \|H_M\|_F^M \|\Phi_M\|_F^M}$, $\|\cdot\|$ — спектральная норма матрицы.

Напомним [3], что $|\sigma_j(L + \Delta) - \sigma_j(L)| < \|\Delta\|$, $j = \overline{1, m}$, где $\sigma_j(\cdot)$ — j -е сингулярное число матрицы; $\Delta = L - L_M$ — возмущение матрицы L .

Отсюда прямо следует утверждение:

$$\text{если } \frac{\sqrt{m}P}{1 - \sqrt{m}P} \mu(L_M) < 1, \quad (9)$$

то при $\sqrt{m}P < 1$ задача (2) (а значит и исходная задача (1)) разрешима.

Проверку достаточного условия разрешимости (9) удобно осуществлять, используя понятие так называемого критического числа обусловленности $\mu_{кр} = \frac{1 - \sqrt{m}P}{\sqrt{m}P}$. В этом случае проверка условия

(9) сводится к проверке выполнения неравенства $\mu(L_M) < \mu_{кр}$.

При исследовании разрешимости плохо обусловленных задач посредством проверки приведенного ранее достаточного условия важно, чтобы оценка возмущений оператора L как можно более точно отражала реальные погрешности. Точность такой оценки качественно влияет на выбор критического значения числа обусловленности.

Представленные условия разрешимости позволяют проводить гарантированное исследование локальной разрешимости исходной задачи в условиях, когда непосредственно доступен лишь ее приближенный образ в вычислительной среде.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Численные эксперименты выполнены для случая наземных наблюдений (измерений дальностей до ИСЗ из одного пункта) околостационарных кеплеровых орбит с различными значениями параметров наклона (i) и эксцентриситета (e).

Как уже отмечалось, ввиду малости констант, входящих в численно-аналитическую оценку (8), ее превосходство над аналитической оценкой (6) определяется отношением

$$\vartheta = \frac{\sqrt{m}\mu(\Phi)}{\|H_M\|_F^M \|\Phi_M\|_F^M (\|(H_M \Phi_M)_M\|_F^M)^{-1}}. \quad (10)$$



Выполнив сравнения значений функции

$$G(\lambda, \varphi) = \max_{t_i} \frac{\|H(t_i, \lambda, \varphi)\|_F^M \|\Phi(t_i, 0)\|_F^M}{\|H(t_i, \lambda, \varphi)\Phi(t_i, 0)\|_F^M},$$

где λ и φ — долгота и широта наземного пункта наблюдения, и соответствующих значений $\mu(\Phi)$, можно утверждать, что численно-аналитическая оценка (8) существенно точнее отражает реальные погрешности, чем оценка (6), а именно, по результатам вычислительных экспериментов, отношение ϑ (10) составляет величину порядка 10^6 – 10^8 . Отметим также, что с уменьшением различия между параметрами долготы наземного пункта наблюдения и стационарной точки, над которой зависает ИСЗ, следует ожидать увеличения относительных возмущений оператора L . Этот факт подтверждается рядом численных экспериментов. Так, например, при решении задачи оценивания методом наименьших квадратов отмечается значительное сужение областей сходимости для пунктов наблюдения, параметр долготы которых мало отличается от параметра долготы стационарной точки.

В качестве результатов численных экспериментов приведем данные, позволяющие получить критические значения числа обусловленности для ряда суточно-синхронных орбит.

В таблице представлены значения $\max_{\lambda, \varphi} G(\lambda, \varphi)$ (λ и φ — долгота и широта наземного пункта наблюдения, соответственно) для суточно-синхронных орбит в зависимости от эксцентриситета e и наклона i при однопозиционных измерениях дальности до объекта.

Максимальные значения функции G

e	i					
	0°	$0,1^\circ$	$0,5^\circ$	1°	2°	4°
0	390,0	390,3	396,2	414,5	494,5	3 127,4
10^{-4}	390,0	390,4	396,3	414,6	494,7	3 130,1
0,005	389,8	390,4	397,8	418,7	509,0	3 266,8
0,01	385,3	386,1	394,9	421,7	518,9	3 420,0
0,1	476,9	477,2	483,9	506,2	621,0	7 404,9

Приведенные значения в случае, когда $\varepsilon_H, \varepsilon_\Phi, \varepsilon_1 \ll 1$, позволяют получить значения критических чисел обусловленности. Приведем конкретный

Пример. Пусть $e = 0,005$ и $i = 0,1^\circ$, что соответствует значению 390,4 в таблице. Поскольку значение P , с точностью до главных членов, определяется выражением

$$P = 390,4(\varepsilon_H + \varepsilon_\Phi + m\varepsilon_1/(1 - 0,5\varepsilon_1(m - 1))),$$

то предельно допустимое значение числа обусловленности для рассматриваемого случая будет следующим — $\mu_{кр} \approx P^{-1}m^{-0,5}$. Для спутниковых орбит величина $m\varepsilon_1$ ($m = 6, \varepsilon_1 < 10^{-15}$), как показывают вычислительные эксперименты, оказывается незначительной в сравнении со значениями ε_H и ε_Φ ($\varepsilon_H, \varepsilon_\Phi \sim 10^{-12}$). Тогда $\mu_{кр} \approx 1,3 \cdot 10^9$. Учитывая, что в данном эксперименте $\mu(L_M) = 1,1 \cdot 10^8$, имеем $\mu(L_M) < \mu_{кр}$, что гарантирует разрешимость рассматриваемой задачи. ♦

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены условия разрешимости линейных динамических задач наблюдения в вычислительной среде с известной точностью выполнения арифметических операций. Подтверждена эффективность предлагаемого подхода в задачах определения орбит ИСЗ.

ЛИТЕРАТУРА

- 16-й симпозиум ИФАК по автоматическому управлению в пространстве // Проблемы управления. — 2005. — № 2. — С. 75–79.
- Девятисильный А. С., Крыжко И. Б. Исследование обусловленности задачи определения квазистационарной орбиты ИСЗ по наземным измерениям // Космические исследования. — 1997. — № 1. — С. 99–101.
- Мальшев А. Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. — Новосибирск: Наука, 1991. — 229 с.

☎ (4232) 31-35-49

e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru



Новая рубрика

В нашем журнале появилась новая рубрика — "Краткие сообщения", в которой редакция намерена публиковать конкретные результаты исследований, новые идеи и подходы к решению задач управления, изложенные в сжатой, но доступной для понимания большинства читателей форме.

Объем краткого сообщения — не более пяти страниц формата А4 вместе со списком литературы и иллюстрациями, текст набирается через полтора интервала, шрифт Times New Roman, кегль 12 пунктов.

Редакция

К ЗАДАЧЕ ВЫСТАВКИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА НЕПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ГРАВИТАЦИОННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А. С. Девятисильный, К. А. Числов

Обсуждено погружение задачи пространственной гравиметрии в задачу выставки трехкомпонентной инерциальной навигационной системы. Приведены модели и результаты вычислительного эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Инерциальные навигационные системы (ИНС) широко применяются для определения линейных и угловых параметров движения объектов различного назначения. Как известно [1, 2], один из источников погрешностей работы ИНС — ошибочные представления о координатах места старта объекта и ориентации системы отсчета, в которой интегрируются модельные уравнения его движения; поэтому предстартовая подготовка ИНС, или ее выставка, рассматривается как необходимый элемент технологии решения навигационной задачи [3].

В настоящей работе в рамках задачи выставки рассматривается проблема гравитационной неопределенности в месте старта объекта. Такая неопределенность, например, имеет место в районах повышенной сейсмической активности, когда в окрестностях (в радиусе до 100 км) очагов землетрясений появляются пространственные аномалии гравитационного поля до 10^{-3} м/с², сохраняющиеся на интервалах времени, исчисляемых месяцами и охватывающих периоды как до, так и после землетрясений [4]. Последнее означает, что оценка аномалий имеет, помимо обеспечения стартовых условий для работы ИНС, еще и конверсионное в определенном смысле значение, если рассматривать указанные аномалии в качестве предвестников землетрясений [4] и иных проявлений геофизических процессов [5].

Для определения траектории методом инерциальной навигации (ИНМ) необходимы достаточно полные представления о модели гравитационного поля. Вместе с тем, если траектория может определяться вне этого метода, например с помощью спутниковой навигационной системы (СНС — типа ГЛОНАСС, GPS и т. п.), то в условиях неопределенности представлений о гравитационном поле

в рамках метода инерциальной навигации вполне правомерна постановка задачи об идентификации поля. Именно такая, но локальная (в точке на Земле) задача и рассматривается в предлагаемой работе.

Обращаясь к фундаментальным представлениям, заметим, что речь идет об интерпретации первой (или, как в 1890 г. предложил называть ее Г.К. Суслов, — обратной [6, 7]) задачи механики [1] — определение сил по известной траектории, которая здесь решается методом инерциальной навигации с погружением в него задачи гравиметрии.

1. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ

Метод инерциальной навигации предполагает моделирование в выбранной системе отсчета уравнений движения материальной точки, с которой отождествляется движущийся объект, — уравнений динамики (Ньютона)

$$\dot{q}_i = \Omega_{ik} q_k + p_i, \quad q_i(0) = q_{i,0}, \quad (1)$$

$$\dot{p}_i = \Omega_{ik} p_k + G_i(q) + F_i, \quad p_i(0) = p_{i,0}; \quad i, k = \overline{1,3}$$

и уравнений эволюции системы отсчета — уравнений кинематики (Эйлера — Пуассона)

$$\dot{a}_{im} = \Omega_{ik} a_{km}, \quad a_{im}(0) = a_{im,0}; \quad i, m, k = \overline{1,3}. \quad (2)$$

В этих уравнениях, записанных в гамильтоновых образах, $q = (q_i)$, $i = \overline{1,3}$ — радиус вектор текущего положения точки на траектории; $p = (p_i)$, $i = \overline{1,3}$ — вектор импульсов, отождествляемый в данном случае с вектором абсолютной скорости точки; $\Omega_{ik} = -e_{ijk}\omega_j$, e_{ijk} — оператор (тензор Леви—Чивита); $\omega = (\omega_i)$, $i = \overline{1,3}$ — абсолютная угловая скорость вращения выбранной системы отсчета (далее всюду будем иметь в виду только прямо-



угольные координатные системы); $G(q) = (G_i(q))$, $i = \overline{1, 3}$ — вектор напряженности гравитационного поля; $F = (F_i)$, $i = \overline{1, 3}$ — вектор удельных сил негравитационной природы; $A = (a_{ij})$, $i, j = \overline{1, 3}$ — матрица преобразования векторов из инерциальной системы отсчета, назовем ее $o\xi = o\xi_1\xi_2\xi_3$, в выбранную вращающуюся — $ox = ox_1x_2x_3$, так что $x = A\xi$; точку o — начало системы отсчета — поместим в центр масс Земли, кроме того, примем, что координатный трехгранник ox (с осями, параллельными осям сопровождающего трехгранника) ориентирован географически, т. е. его ось ox_3 направлена по вектору q , а ось ox_2 лежит в плоскости географического меридиана места и направлена на север; здесь и далее действует правило Эйнштейна — по повторяющимся индексам (у нас только нижним) производится суммирование. Учитывая, что рассматривается случай неподвижного основания, имеем $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$, где $\omega_1 = 0$, $\omega_2 = u \cos \phi$, $\omega_3 = u \sin \phi$; ϕ — географическая широта места объекта (пункта гравиметрии); u — значение угловой скорости вращения Земли.

При интегрировании уравнений (1) и (2) полагаются заданными начальные условия (q_0, p_0, A_0) , а также текущие значения ω и F , которые измеряются с помощью гироскопов и ньютонометров (акселерометров) — инерциальных приборов, собственно и дающих название методу. Наличие погрешностей в данных и в измерениях ведет к погрешностям интегрирования — δq , δp , δA , уравнения эволюции которых в линейном приближении с учетом вида уравнений (1) и (2) можно представить следующим образом:

$$\delta \dot{q}_i = \Omega_{ik} \delta q_k + \delta p_i + Q_{ik} v_k, \quad \delta q_i(0) = \delta q_{i,0}, \quad (3)$$

$$\delta \dot{p} = \Omega_{ik} \delta p_k + \delta G_i(q) + f_i + P_{ik} v_k, \quad \delta p_i(0) = \delta p_{i,0},$$

$$\dot{\beta}_i = \Omega_{ik} \beta_k + v_i, \quad \beta_i = \beta_{i,0}, \quad i = \overline{1, 3},$$

где $v = (v_i)$ и $f = (f_i)$, $i = \overline{1, 3}$ — векторы инструментальных погрешностей гироскопических измерителей и ньютонометров; $Q_{ik} = e_{ijk} q_j$; $P_{ik} = e_{ijk} p_j$; $\beta = (\beta_i)$, $i = \overline{1, 3}$ — вектор малого угла, характеризующий погрешность интегрирования кинематических уравнений, так что $\delta A_{ik} = e_{ijk} \beta_j$; погрешность моделирования гравитационного поля $\delta G(q)$ — будет обсуждена далее.

Заметим, что инерциальные измерения и интегрирование уравнений (1) и (2) выполняются в осях приборного трехгранника $ou = ou_1u_2u_3$, жестко связанного с измерительной платформой и являющегося физической моделью трехгранника ox , так что $\delta q = (\delta q_1, \delta q_2, \delta q_3)^T$.

Если доступна информация от СНС о месте объекта (платформы), то сравнение ее с аналогичной информацией, предоставляемой ИНС, приводит к следующим невязкам двух решений:

$$J_i^q = \delta q_i - Q_{ij} \beta_k + \varepsilon_i^q, \quad (4)$$

$$J_i^p = \delta p_i - W_{ik} \beta_k + \varepsilon_i^p$$

где $W_{ik} = e_{imk} Q_{ms} \omega_s$; $\varepsilon^q = (\varepsilon_i^q)$ и $\varepsilon^p = (\varepsilon_i^p)$, $i = \overline{1, 3}$ — инструментальные погрешности СНС-измерителя, причем $\varepsilon_i^p = \Omega_{ik} \varepsilon_k^q$, $i, m, k = \overline{1, 3}$.

Вернемся теперь к обсуждению погрешности моделирования напряженности гравитационного поля $\delta G(q)$. Еще раз обращая внимание на то, что в данной статье основной акцент делается на локальной задаче пространственной гравиметрии, модель напряженности поля можно задать в виде $G_i(q) = G_i = \text{const}$, $i = \overline{1, 3}$, тогда

$$\delta G_i(q) = g_i, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где $g = (g_i)$ — аномалия — отклонение напряженности поля в точке наблюдения от известного значения $G = \text{const}$; примем, что и $g = \text{const}$, ориентируясь, таким образом на достаточно медленные по сравнению с временем наблюдения процессы.

Заметим, что при таком модельном представлении гравитационного поля из уравнений ИНМ исключается шулеровская компонента частоты, что существенно отличает их от традиционных [2, 3], описывающих эволюцию погрешностей работы ИНС. Учитывая только что изложенное и продолжая формирование модели задачи, дополним уравнения (3) уравнениями

$$\dot{g}_i = 0, \quad g_i(0) = g_{i,0}, \quad (6)$$

$$\dot{v}_i = -\lambda_i^v v_i + \sqrt{2\lambda_i^v} \sigma_i^v u_i^v, \quad v_i(0) = v_{i,0},$$

$$\dot{f}_i = -\lambda_i^f f_i + \sqrt{2\lambda_i^f} \sigma_i^f u_i^f, \quad f_i(0) = f_{i,0}; \quad i = \overline{1, 3},$$

где первые три утверждают гипотезу о неизменности аномалии поля на временном интервале наблюдения, а последние шесть на этом же интервале — гипотезу о погрешностях инерциальных измерителей как о марковских случайных процессах первого порядка, порождаемых белым шумом единичной интенсивности процессами u_i^v и u_i^f , $i = \overline{1, 3}$; значения величин λ_i^v , λ_i^f , σ_i^v , σ_i^f полагаются известными. Система дифференциальных и алгебраических уравнений (3) и (4) с учетом уравнений (5) и (6) является формальным описанием обратной задачи, цель решения которой состоит в определении значений совокупности векторов $\{\delta q, \delta p, \beta, g, v, f\}$, отождествляемой далее с вектором состояния x , $\dim x = 18$. Таким образом, задача

гравиметрии погружена в более общую задачу — выставки трехкомпонентной (3D) ИНС на неподвижном основании. Отметим следующее. Если производить гравиметрическую съемку с помощью и баллистического гравиметра [8], измеряющего значение $|G|$, то можно ограничиться схемой 2D-ИНМ, сохраняя в качестве идентифицируемых только горизонтальные (g_1 и g_2) составляющие вектора аномалии g . Соответствующие модельные представления 2D-задачи можно сформировать из уже полученных выше, если в последних исключить измерения J_3^q и J_3^p и уравнения эволюции значений δq_3 , δp_3 , g_3 и f_3 , а в оставшихся аннулировать члены, содержащие указанные переменные. Завершение формальной постановки обратной задачи требует проверки ее, постановки, корректности, или анализа разрешимости задачи. Современная теория систем [9] отождествляет проблему разрешимости с проблемой наблюдаемости, суть которой состоит в установлении соответствия между размерностью базиса пространства образов оператора задачи и размерностью декларируемого вектора желаемого решения. Строго (если точно придерживаться представлений Ж. Адамара о корректности [10]), с учетом ориентации способа решения на современные вычислительные средства и конечную точность представления чисел в них, следует иметь в виду и необходимость процедурной поддержки указанного соответствия (т. е. обеспечения численной устойчивости решения), если принципиально таковое установлено.

Как показал анализ рассматриваемой здесь задачи (он включает в себя стандартную процедуру построения базиса пространства, порожденного оператором задачи), требуемое соответствие имеет место и нарушается только в одном случае — когда вектор угловой скорости ω вращения Земли лежит на оси ox_3 , т. е. когда пункт наблюдения расположен на одном из географических полюсов Земли. Достаточно полное количественное представление об обусловленности задачи может быть получено, если перейти к конечномерной форме модели задачи в виде, декларирующем ее как задачу метода наименьших квадратов (МНК), а именно:

$$J(k) = H\Phi^k x_0 + H \int_0^{t_k} \Phi(t, \tau) v(\tau) d\tau + \varepsilon(k),$$

$$k = \overline{0, N}, \quad (7)$$

где k — номер цикла измерений, выполняемого в момент времени $t_k = kh$, $k = \overline{0, N}$, $h = \text{const}$, так что $T = Nh$ и $t_k \in [0, T]$; x_0 — начальное значение вектора состояния (x) системы ((3) и (6)), $\dim x = 18$; $\Phi(t, \tau)$ — фундаментальная матрица решений, соответствующая системе ((3) и (6)), так что $\Phi(t_k) =$

$= \Phi^{k-1} \Phi = \Phi^k$; $v(k)$ — вектор случайных возмущений в правых частях уравнений (3) и (6), $\dim v(k) = \dim x$, причем только шесть последних компонент вектора $v(k)$ отличны от нуля; $J(k) = J(t_k)$ — вектор измерений с компонентами $J_i^q(t_k)$ и $J_i^p(t_k)$, $i = \overline{1, 3}$; H — матрица коэффициентов при переменных состояниях в модели измерений (4); $\varepsilon(k) = \varepsilon(t_k)$ — вектор инструментальных погрешностей измерений с компонентами $\varepsilon_i^q(t_k)$ и $\varepsilon_i^p(t_k)$, $i = \overline{1, 3}$.

Вместе с тем непосредственное решение рассматриваемой в настоящей работе задачи наиболее просто реализуется в виде хорошо известной [11] калмановской оценки состояния дискретного процесса с моделью

$$x(k+1) = \Phi x(k) + v(k), \quad x(0) = x_0, \quad (8)$$

$$J(k+1) = Hx(k+1) + \varepsilon(k+1),$$

где задействованы ранее введенные при формировании модели (7) обозначения.

2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

При проведении вычислительных экспериментов ставились две цели — оценка разрешимости рассматриваемой задачи в условиях конечной точности представления чисел в ЭВМ, для чего использовалась модель (7), и проверка эффективности калмановской процедуры решения (8).

Отметим, что все эксперименты проводились на ЭВМ с относительной точностью вычислений $\varepsilon_1 = 10^{-50}$ [12]. Для достижения первой цели выполнены сингулярные разложения матричного опера-

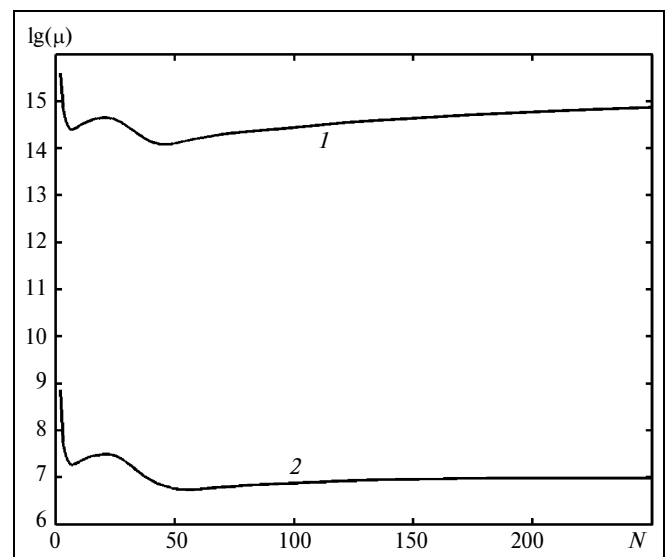


Рис. 1. Значения чисел обусловленности оператора модели (7): 1 — исходная обусловленность; 2 — обусловленность нормированного оператора

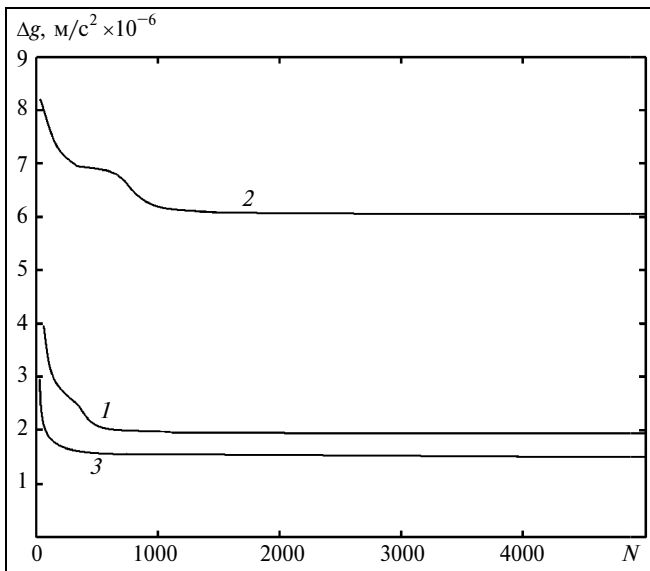


Рис. 2. Графики эволюций погрешностей Δg_i , $i = \overline{1, 3}$

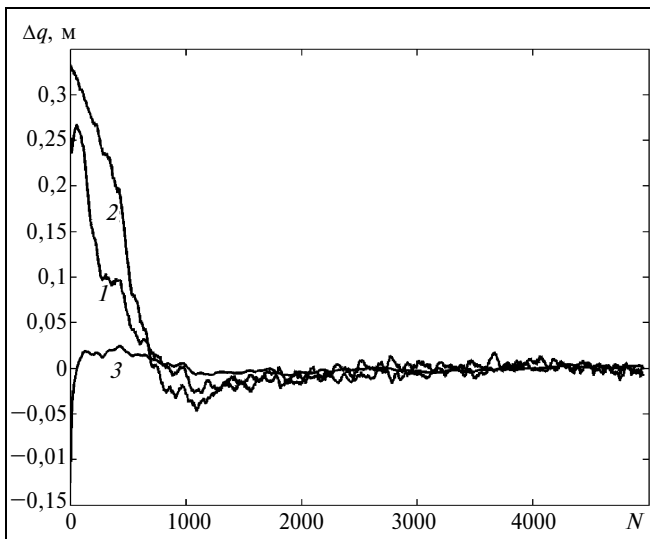


Рис. 3. Графики эволюций погрешностей Δq_i , $i = \overline{1, 3}$

тора модели (7) при различных N (при $h = 100$ с) и определены значения его числа обусловленности $\mu(N)$.

График $\lg \mu(N)$ приведен на рис. 1 под номером 1; ниже расположен график 2 для нормированного по столбцам матричного оператора модели (7), характеризующий практически предельные возможности улучшения обусловленности задачи методом преобразования исходных переменных состояния. Достоверность графиков обеспечивается высокой степенью точности представления в ЭВМ матрицы Φ , как матричной экспоненты, легко разлагаемой в степенной ряд требуемой для подтверждения этой

точности длины. Как видно из рис. 1 имеет место плохая обусловленность задачи, и для уверенного устойчивого ее решения в случае, например, применения обобщенного МНК (с взвешиванием измерений) обычно практикуемой в ЭВМ относительной точности вычислений $\varepsilon_1 \approx 10^{-16} \div 10^{-19}$ [12] было бы явно недостаточно и потребовалось бы ее значительное повышение. Здесь становится понятной и причина, по которой и само исследование обусловленности выполнено при повышенной относительной точности ε_1 .

Такая обусловленность задачи указывает также на то, что для получения приемлемых по точности

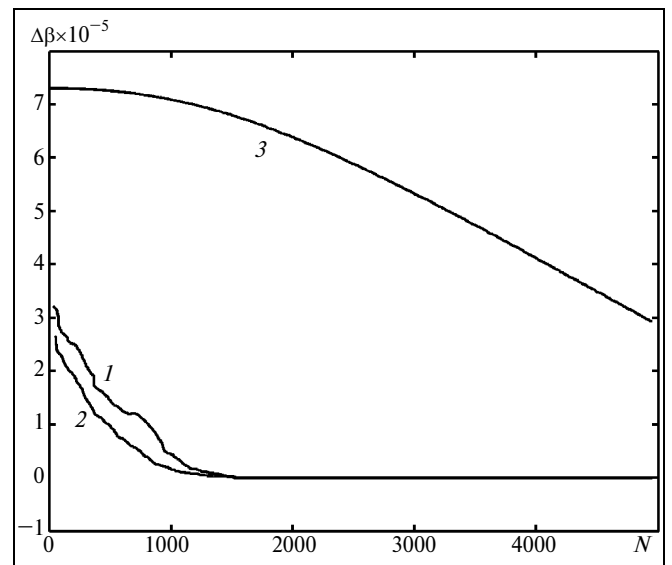


Рис. 4. Графики эволюций погрешностей $\Delta \beta_i$, $i = \overline{1, 3}$

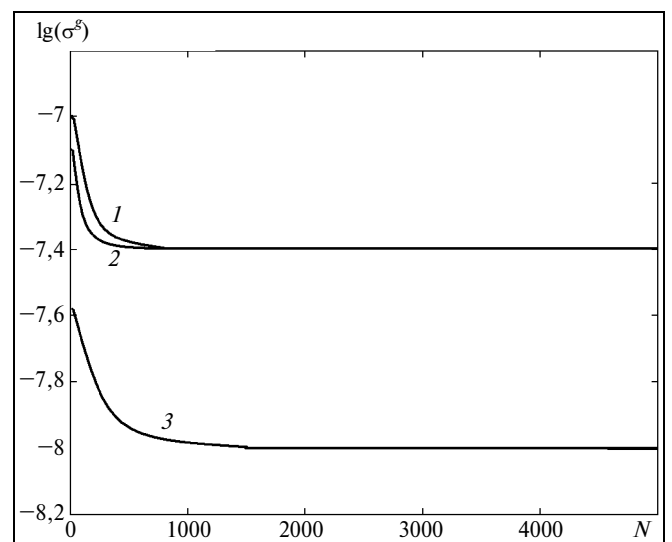
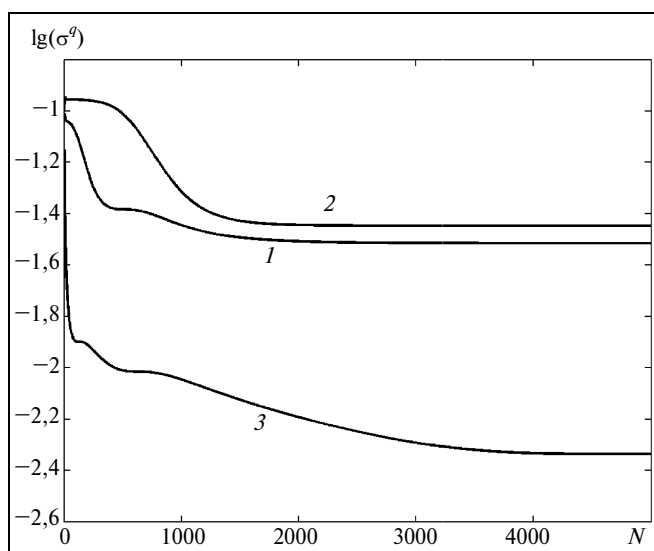
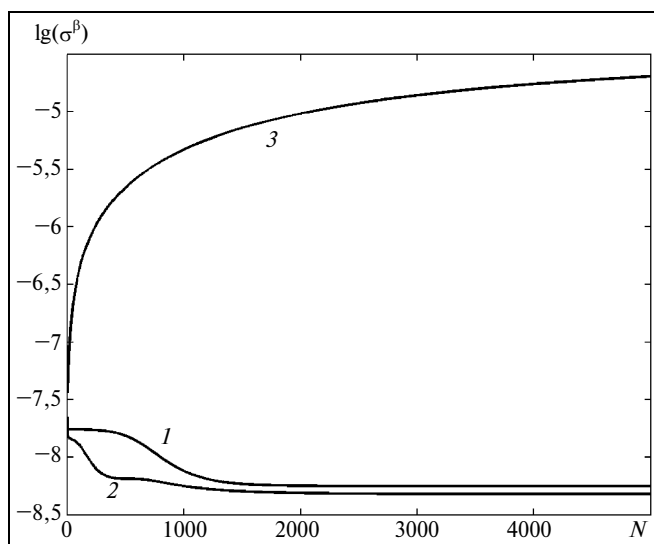


Рис. 5. Графики эволюции СКП оценки параметров g_i , $i = \overline{1, 3}$


 Рис. 6. Графики эволюции СКП оценки параметров q_i , $i = \overline{1, 3}$

 Рис. 7. Графики эволюции СКП оценки параметров β_i , $i = \overline{1, 3}$

решений ее в условиях стохастических возмущений потребовалось бы значительное число (N) циклов измерений. Оба эти положения — необходимость снижения значения ε_1 и увеличения числа N — подтвердились и в ходе вычислительных экспериментов с участием калмановского алгоритма оценивания. Рис. 2—7 представляют один из этих экспериментов для случая, когда $\phi = 45^\circ$, $h = 20$ с, среднеквадратические значения погрешностей (СКП) СНС-измерений $\sigma_i^q = 0,1$ м, $i = \overline{1, 3}$; а значения величин, характеризующие инструментальные погрешности инерциальных измерителей,

суть $\lambda = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $\lambda_i^f = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, $\sigma_i^v = 5 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ (или $0,001^\circ/\text{ч}$), $\sigma_i^f = 10^{-6} \text{ м/с}^2$. На рис. 2—4 представлены графики эволюций погрешностей (Δg_i , Δq_i и $\Delta \beta_i$, $i = \overline{1, 3}$) оценивания переменных состояния (g_i , δq_i и β_i , $i = \overline{1, 3}$), а на рис. 5—7 графики СКП (σ_i^g , σ_i^q , σ_i^β , $i = \overline{1, 3}$) их оценивания; номера графиков соответствуют индексам переменных. В целом, что видно из рис. 2—7, выполненные исследования проблемы погружения задачи 3D-гравиметрии в более общую задачу указывают на достаточную эффективность и актуальность такого подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дана интерпретация первой задачи механики, ориентированная на решение задачи 3D-гравиметрии в рамках метода инерциальной навигации; представлены ее модели с указанием отличительных черт; выполнены теоретико-численные исследования, результаты которых указывают, несмотря на плохую обусловленность задачи, на реальность ее решения.

ЛИТЕРАТУРА

- Ишлинский А. Ю. Классическая механика и силы инерции. — М.: Наука, 1987. — 320 с.
- Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации (корректируемые системы). — М.: Наука, 1967. — 648 с.
- Инерциальная навигация. Анализ и проектирование / Под ред. К. Ф. О'Доннела. — М.: Наука, 1969. — 648 с.
- Иванов В. В. Изменение гравитационных аномалий при сильнейших землетрясениях // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Вып. 1: Сб. ст. — Владивосток: ДВО РАН, 2005. — С. 60—68.
- Применение гравиинерциальных технологий в геофизике / Сб. статей и докл. — СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ «Электроприбор», 2002. — 199 с.
- Суслов Г. К. О силовой функции, допускающей данные интегралы. — Киев, 1890. — 90 с.
- Галиуллин А. С. Обратные задачи динамики. — М.: Наука, 1981. — 143 с.
- Арнаутов Г. П. Результаты международных метрологических сравнений абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автометрия. — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 126—136.
- Калман Р., Фалб М., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. — М.: Мир, 1971. — 400 с.
- Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1972. — 223 с.
- Медич Дж. Статистически оптимальные оценки и управление. — М.: Энергия, 1973. — 440 с.
- Малышев А. Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. — Новосибирск: Наука, 1991. — 229 с.

☎ (4232) 31-35-49

e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

kirillche@rambler.ru



ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСЕПТРОНОВ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕКОНСТРУКТИВНОЙ ТОМОГРАФИИ

Ю. Н. Кульчин, И. В. Денисов, А. В. Панов, Н. А. Рыбальченко

Представлены принципы решения нелинейных задач реконструктивной томографии с помощью нейронных сетей типа «персептрон». Показаны особенности нейронных сетей, позволяющие значительно увеличить эффективность вычислительного процесса реконструкции исследуемых физических полей, технических и технологических объектов. Предложены пути практической реализации нейронных сетей на основе многослойного персептрона и области их применения.

ВВЕДЕНИЕ

Задача томографической реконструкции функций распределения физических полей стала достаточно актуальной в последние десятилетия в связи с расширением области практического применения ее решений и быстрым развитием компьютерной техники, позволяющим создавать и применять новые высокоскоростные методы сбора и обработки информации, поступающей от измерительных устройств [1].

Возможен как параллельный, так и последовательный сбор информации. Первый из них позволяет осуществлять сбор больших массивов данных за один акт, но, как правило, очень сложен в реализации. Второй значительно выигрывает в простоте реализации, но уступает в скорости обработки массивов данных, что существенно сказывается при восстановлении объектов большой протяженности.

Различие устройств обработки собранной информации определяется выбором чисто компьютерного или предварительного аппаратного решения применяемых математических алгоритмов. В первом из этих случаев алгоритмы реализуются в виде программ в персональном компьютере, поэтому устройства сбора информации от детектирующих систем осуществляют простейшие преобразования информации в цифровую форму. Во втором случае алгоритмы реализуются аппаратно, т. е. осуществляются необходимые функциональные преобразования поступающей информации и

обработанная информация передается для интерпретации и визуализации на компьютер.

Математически постановка томографической задачи заключается в восстановлении параметров исследуемых объектов по интегральным данным, поступающим от измерительных линий. Как правило, число измерительных линий значительно меньше числа элементов исследуемых полей. В результате число неизвестных в уравнениях превосходит число уравнений, в связи с чем задача томографического восстановления функций распределения исследуемой величины по неполным интегральным данным является некорректной [2].

Разработано большое число алгоритмов, применяемых при восстановлении информации о параметрах распределенных физических полей. Это объясняется как исключительным разнообразием постановок томографических задач и способов реализации их решений, так и непрерывающимися усилиями специалистов разработать алгоритмы, превосходящие известные хотя бы по одному из следующих параметров: быстродействию, объему памяти, разрешающей способности, контрасту, числу необходимых проекций и др. [3].

Среди существующих типов томографических задач выделяются нелинейные задачи, возникающие в случае криволинейных измерительных линий либо в случае нелинейной зависимости интегральных данных от измеряемой величины, вызванной физическими характеристиками носителя сигнала. При решении нелинейных томографических задач прибегают к адаптации существующих алгоритмов к условиям эксперимента. В результа-

те чего, как правило, возрастают требования к вычислительным мощностям и одновременно снижается точность восстановления. В реальных условиях траектории измерительных линий, размер и характер влияния исследуемой характеристики объекта на уровень интегрального сигнала могут варьироваться, что снижает точность реконструкции.

Наиболее перспективный способ решения томографических задач заключается в применении алгоритмов работы нейронных сетей (НС), обладающих рядом положительных качеств, наиболее важными из которых, применительно к реконструктивной томографии, являются свойства адаптации и обобщения. Свойство адаптации НС к конкретным условиям задачи, возникает в результате ее обучения. Обобщение обученной НС заключается в том, что она может решать задачу для первоначально неизвестных для нее распределений, принадлежащих к тому же классу, что и использовавшиеся при обучении.

Цель данной работы состоит в представлении принципов нейросетевых способов решения нелинейных задач реконструктивной томографии.

1. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Существует ряд НС, алгоритмы работы которых позволяют осуществлять реконструкцию распределенных физических полей. Исследование этих НС, вопросов их применимости и оптимального функционирования после обучения остается открытым. Среди наиболее часто применяемых для решения томографических задач НС можно выделить НС типа многослойного персептрона, обладающего высокими потенциальными возможностями по сравнению с другими НС.

Такая НС представляет собой однонаправленную НС, состоящую из нескольких слоев, сигналы в которой передаются только в одном направлении, от входного слоя к выходному, причем нейроны одного слоя связаны только с нейронами последующего по ходу распространения сигналов слоя и не связаны друг с другом в одном слое [4]. Персептроны бывают однослойными с простой, прозрачной архитектурой и ограниченными возможностями. Как правило, такие НС применяются для частной классификации гладких функций. Поскольку данная линейная разделимость ограничивает возможности персептронного представления [5], то вводят дополнительные слои, образуя многослойные НС типа персептрона, применяющиеся для общей классификации выпуклыми областями [6].

На рис. 1 показана архитектура трехслойного персептрона, чаще всего применяемого для реше-

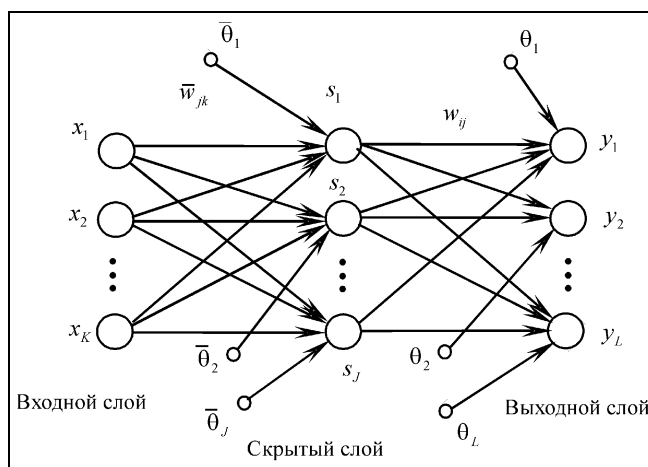


Рис. 1. Схема нейронной сети типа персептрона с тремя слоями нейронов

ния томографических задач. Первый слой нейронов выступает в качестве входа НС, формируя входной вектор $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$, где x_1, x_2, \dots, x_K — интегральные данные, снимаемые с выходов измерительной системы, K — число нейронов во входном слое, равное числу измерительных линий. Первый слой НС не несет никакой иной функциональной нагрузки. Второй слой нейронов сети (так называемый скрытый слой) осуществляет преобразование вида:

$$s_j = f\left(\sum_{k=1}^K \bar{w}_{jk} x_k\right) + \bar{\theta}_j, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (1)$$

где s_j — выходные состояния нейронов второго слоя, \bar{w}_{jk} — коэффициенты матрицы межнейронных связей первого и второго слоев, определяющие связь между k -м нейроном первого слоя и j -м нейроном второго слоя, $\bar{\theta}_j$ — пороговые уровни скрытого слоя, J — число нейронов во втором слое, f — эмпирически подбираемая функция активации, в качестве которой используются линейные, сигмоидные (например, униполярная сигмоида или гиперболический тангенс), радиально-базисные зависимости. Выходной слой обычно осуществляет линейное преобразование вида:

$$y_i = \sum_{j=1}^J w_{ij} s_j + \theta_i, \quad i = 1, 2, \dots, L, \quad (2)$$

где y_i — активации нейронов выходного слоя, w_{ij} — коэффициенты матрицы межнейронных связей второго и третьего слоев, θ_i — пороговые уровни для выходного слоя, L — число нейронов в третьем слое. Число нейронов в каждом из слоев обычно



выбирается в соответствии с условиями решаемой задачи.

Процесс подбора элементов матрицы связей и векторов пороговых значений \bar{w}_{jk} , w_{ij} , $\bar{\theta}_j$, θ_i при минимизации ошибки рассогласования требуемых выходных значений с получаемыми для решения какой-либо задачи называется обучением нейронной сети. Обучение персептрона производится с помощью обучающих образов — набора пар входных векторов нейросети X и соответствующих им заранее известных выходных векторов $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_L\}$.

Обучение персептрона представляет собой оптимизационную задачу, которая часто решается с помощью таких методов, как градиентные, имитация отжига [7], их комбинаций и др. Как было показано в работах [8, 9], основанных на теореме Колмогорова [10], персептрон с нелинейной монотонной функцией активации, имеющей конечные значения, способен с заданной точностью аппроксимировать различные функции, а значит решать и задачу реконструктивной томографии.

2. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕКОНСТРУКЦИИ

В качестве наиболее показательного применения НС типа «персептрон» для решения рассматриваемой задачи может служить реконструкция данных радиочастотной, волоконно-оптической и ультразвуковой томографий.

Радиочастотная томография представляет собой метод получения информации о распределении электромагнитных характеристик внутри некоторого объекта. Чаще всего применяется электроимпедансная томография, с помощью которой решаются задачи медицинской диагностики, геофизики, исследуются комплексные потоки газов или жидкостей в трубах и др. Реконструкция распределения исследуемой величины здесь представляет собой сложную нелинейную задачу, для решения которой в первой половине 1990-х гг. были предложены НС. На первых этапах это были простые НС типа ADALINE, которые обеспечивали весьма грубое восстановление образа [11]. Далее НС типа «персептрон» с одним скрытым слоем двухсигмоидальных активационных функций применялись для восстановления и одновременной классификации моделируемых трехкомпонентных потоков, протекающих по трубам кругового сечения [12]. Для восстановления моделируемых электроимпедансных сигналов в работах [13, 14] использовались линейные и нелинейные НС типа «персептрон», соответственно. Такой подход позволил авторам существенно снизить требования к

вычислительным ресурсам, что, однако, уменьшило обобщающие способности НС. Более сложная задача восстановления распределений электрического импеданса, получаемых при медицинском исследовании пациентов, решалась с помощью двухслойной линейной НС и персептроном, описываемым уравнениями (1), (2) [15]. Для обучения использовались наборы обучающих образов из 1,5–2-х тыс. обучающих образов, в которые добавлялся шумовой сигнал, уровень которого составлял порядка одного процента от максимального уровня входного сигнала. Для обучения применялся метод обратного распространения ошибки с оптимизацией методом сопряженных градиентов. Для более эффективного обучения НС, решающих обратную задачу электроимпедансной томографии, кроме градиентной оптимизации при обучении многослойного персептрона, показан байесовский подход [16]. Нейронная сеть, обученная байесовским способом, более точно по сравнению с градиентным методом восстанавливает моделируемые распределения, отображающие формирование газового пузырька внутри трубы с жидкостью (двухкомпонентной средой) [17].

Волоконно-оптическая томография представляет собой метод восстановления информации о параметрах физических полей (температурных, деформационных и др.) по данным, снимаемым с волоконно-оптических измерительных линий, уложенных в соответствии с выбранной схемой сканирования и образующих вместе с устройствами ввода оптического излучения и обработки снимаемой информации волоконно-оптическую измерительную систему [18]. Изменяющиеся оптические сигналы на выходах измерительных линий образуют массив данных, содержащих информацию о параметрах физических полей, и чрезвычайно важна их оперативная обработка. Такие измерительные системы обладают рядом исключительных преимуществ, связанных с широко известными особенностями волоконно-оптической элементной базы по сравнению с устройствами на другой элементной базе: широкая полоса пропускания волоконных световодов, их нечувствительность к электромагнитным помехам и малые масса и габариты. Волоконные световоды являются диэлектриками, пожаро- и электробезопасны [19].

В работах [20–24] представлены результаты восстановления исследуемого распределения с помощью линейного персептрона. Обучение НС и восстановление тестовых образов производились для гладких распределений с дельта-правилом модификации элементов w_{ij} матрицы связей: $\Delta w_{ij} = \varepsilon x_i (y_j - \tilde{y}_j)$, где ε — параметр, задающий скорость обучения, x_i — состояние нейрона i -го вход-

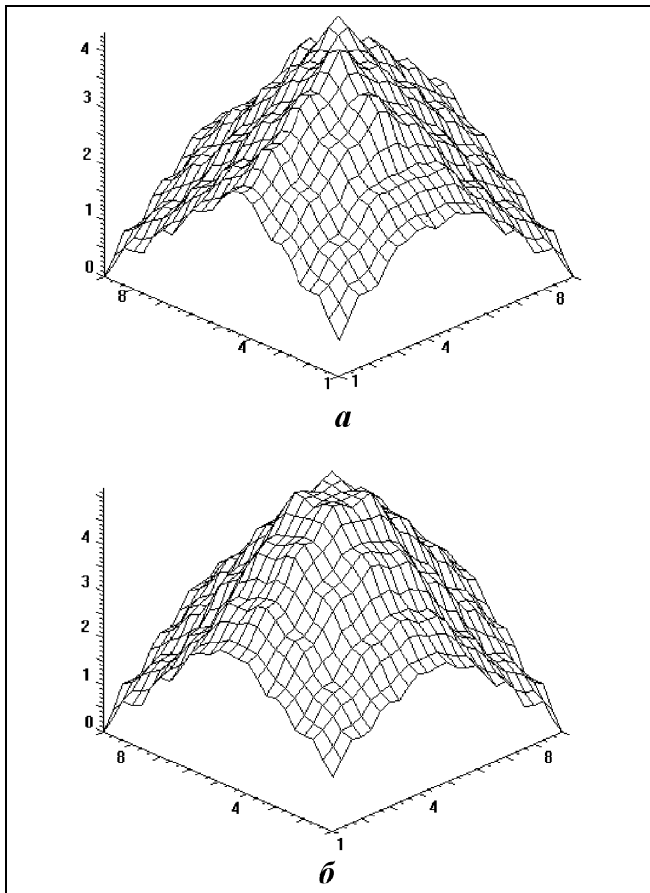


Рис. 2. Оригинальное распределение (а) и результат его восстановления персептроном с линейной функцией активации (б)

ного слоя, \tilde{y}_j — значения выходов нейросети для обучающего образа. В работах [21, 25] найдено выражение для нахождения оптимального значения ε для линейного персептрона. Результаты восстановления моделируемого тестового образа размерами 8×8 , полученные в работе [20], представлены на рис. 2 [25]. Проведено моделирование двухслойной НС типа «персептрон» с 31-м входным и 64-мя выходными нейронами. Формирование матрицы связей потребовало 22 500 циклов при 32-х обучающих парах.

На основе проведенного моделирования в работе [22] представлена НС, реализованная на базе набора амплитудных голограмм, записываемых на дисковом голографическом носителе, предназначенная для обработки выходных данных распределенной волоконно-оптической измерительной сети. Экспериментально показано, что данная система позволяет восстанавливать функции пространственного распределения исследуемой физической величины с погрешностью в отдельной точке не более 20 %.

В дальнейшем для решения данной томографической задачи использовалась модель трехслойного персептрона с активационной функцией гиперболического тангенса в нелинейном внутреннем слое [23, 26]. Точность восстановления распределения исследуемого физического поля определялась качеством обучения НС. Ошибка рассогласования между истинным и восстановленным распределениями определялась выражением

$$D = \frac{1}{2} \sum_{\mu, i} (y_i^{\mu} - \tilde{y}_i^{\mu})^2,$$

где μ — номер пары входного и выходного векторов из обучающей страницы, \tilde{y}_i^{μ} — требуемое состояние соответствующего выходного нейрона. Сочетание градиентных методов и моделирования отжига позволили обеспечить эффективное обучение НС.

В работе [23] с целью более эффективного обучения НС в обучающие образы добавлялся шум, моделирующий случайные ошибки, возникающие при измерениях, ограниченную точность датчиков и т. п. Для этого множество обучающих образов было расширено (увеличено в три раза) путем добавки в него векторов, формируемых следующим образом: $\tilde{y}_{i, noise}^{\mu} = \tilde{y}_i^{\mu} (1 + \eta)$, где $\tilde{y}_{i, noise}^{\mu}$ — обучающий образ с шумовой добавкой, η — случайное число из интервала $[-\varepsilon, \varepsilon]$, ε — «интенсивность шума». Авторами подробно исследовано влияние «интенсивности шума» на скорость и качество обучения персептрона, а также на точность восстановления тестовых образов.

Наличие у разных НС как положительных, так и отрицательных сторон стимулирует исследователей комбинировать их с другими математическими алгоритмами. Так, в работе [27] успешно продемонстрирован перспективный алгоритм на основе комбинации приближенных алгебраических методов обработки информации из волоконно-оптической измерительной сети и НС типа «персептрон», имеющей 31 нейрон на входе и 64 нейрона на выходе.

Отметим также исследования по применению НС типа многослойного персептрона для восстановления данных ультразвуковой томографии. Авторы работы [27] применили такие НС к восстановлению моделируемых и экспериментальных данных для распределения 4×4 пикселя. Нейронная сеть оказалась способной обнаруживать воздействие в исследуемой области, однако его локализация была весьма приблизительной, что можно объяснить ограниченными вычислительными ресурсами, недостаточными для обучения нейросети.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейронные сети типа многослойного персептрона могут эффективно применяться для решения обратных задач томографии. К достоинствам персептрона при решении задач реконструктивной томографии можно отнести высокую скорость обработки данных, способность обобщения, простую структуру самой сети, которая может быть изготовлена на базе как электронных, так и оптических элементов. К недостаткам относят необходимость большого числа обучающих образов и длительность процесса обучения. При необходимости с помощью персептрона может быть одновременно решена задача и классификации обрабатываемых данных. Однако методы подбора обучающих выборок и комбинирование нейронной сети с другими вычислительными алгоритмами требуют дальнейшего исследования.

Несомненны достоинства оптических способов реализации нейронных сетей для решения томографических задач, в частности, с помощью голограмм [22]. Перспективна реализация персептрона в виде набора оптических нейрончиков, выполненных на основе плоских волноводов и призм [28], позволяющих осуществлять параллельную обработку интегральных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Наттерер Ф.* Математические аспекты компьютерной томографии. — М.: Мир, 1990. — 280 с.
2. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1986. — 288 с.
3. *Хермен Г.* Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. — М.: Мир, 1983. — 152 с.
4. *Widrow B., Lehr M. A.* 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation // Proc. IEEE. — 1990. — Vol. 78, — N 9. — P. 1415–1442.
5. *Минский М., Папперт С.* Персептроны. — М.: Мир, 1971. — 261 с.
6. *Уоссерман Ф.* Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика. — М.: Мир, 1992. — 240 с.
7. *Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P.* Optimization by simulated annealing // Science. — 1983. — Vol. 220, — N 4598. — P. 671–680.
8. *Funahashi K.* On the approximate realization of continuous mapping by neural networks // Neural Networks. — 1989. — Vol. 2. — P. 183–192.
9. *Hornik K., Stinchcombe M., White H.* Multilayer feedforward networks are universal approximators // Neural Networks. — 1989. — Vol. 2. — P. 359–366.
10. *Колмогоров А. Н.* О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Докл. АН СССР. — 1957. — Т. 114, — № 5. — С. 953–956.
11. *Adler A., Guardo R.* A neural network image reconstruction technique for electrical impedance tomography // IEEE Trans. Med. Imag. — 1994. — Vol. 3. — P. 594–600.
12. *Nooralahiyani A. Y., Hoyle B. S.* Three-component tomographic flow imaging using artificial neural network reconstruction // Chemical Engineering Science. — 1997. — Vol. 52. — P. 2139–2148.
13. *Ratajwicz-Mikolajczak E., Shirkoohi G. H., Sikora J.* Two ANN Reconstruction methods for electrical impedance tomography // IEEE Trans. Magn. — 1998. — Vol. 34. — P. 2964–2967.
14. *Netajatali A., Ciric I. R.* An Iterative algorithm for electrical impedance imaging using neural networks // IEEE Trans. Magn. — 1998. — Vol. 34. — P. 2940–2943.
15. *Коржаневский А. В.* Нейросетевые алгоритмы решения обратных проблем в радиочастотной томографии // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. — 2002. — № 9-10. — С. 26–33.
16. *Neal R. M.* Bayesian Learning for Neural Networks. Lecture Notes in Statistics. — Springer-Verlag, 1996. — Vol. 118.
17. *Vehtari A., Lampinen J.* Bayesian MLP neural networks for image analysis // Pattern Recognition Letters. — 2000. — Vol. 21. — P. 1183–1191.
18. *Кульчин Ю. Н.* Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. — М.: Физматлит, 2001. — 272 с.
19. *Снайдер А., Лав Д.* Теория оптических волноводов. — М.: Мир, 1987. — 656 с.
20. *Kulchin Yu., Kamenev O.* Self-training neural network model for real time tomography data processing // Lazer Biology. — 1995. — Vol. 4, — N 2. — P. 625–629.
21. *Holographic neural network for processing of signals of distributed optical fiber measuring networks with the tomographic principle of data gathering / Yu. Kulchin, O. Vitrik, Yu. Petrov, et al. // Optical Memory & Neural Networks. — 1997. — Vol. 6, — N 2. — P. 149–156.*
22. *Кульчин Ю. Н., Денисов И. В., Каменев О. Т.* Оптоэлектронная нейророботная система обработки выходных данных волоконно-оптической измерительной сети // ПЖТФ. — 1999. — Т. 25. — Вып. 6. — С. 65–70.
23. *Kulchin Yu. N., Denisov I. V., Denisova E. V.* Selection of optimal parameter of speed of training of neural network perceptron type // Proc. SPIE. — 2003. — Vol. 5129. — P. 162–167.
24. *Kilchin Yu. N., Panov A. V.* Neural network for reconstruction of signal from distributed measuring system of optical amplitude sensors // Pacific Science Review. — 2001. — Vol. 3. — P. 1–4.
25. *Neural data processing method for fiber-optic distributed measuring systems / I. V. Denisov, O. T. Kamenev., A. Yu. Kim, et al. // Optical Memory & Neural Networks. — 2003. — Vol. 12, — N 3. — P. 165–172.*
26. *Application of algebraic and neural-like methods for reconstruction of distribution functions of physical fields / Yu. N. Kulchin, E. V. Denisova, I. V. Denisov // Optical Memory & Neural Networks. — 2003. — Vol. 12, — N 4. — P. 283–297.*
27. *A neural network approach to ultrasonic tomography / D. A. Hutchins, J. T. Mottram, E. L. Hines, P. Corcoran, D. M. Anthony // Proc. IEEE. — 1992. — Vol. 1. — P. 365–368.*
28. *Prismatic neural chip for distributed measuring networks / Yu. N. Kulchin, I. V. Denisov, E. V. Denisova, E. N. Piskunov // Optical Memory & Neural Networks. — 2003. — Vol. 12, — N 3. — P. 237–242.*
29. *Architecture of the neural-like photosensitive system for solution of the fiber-optic tomography problem / Y.N. Kulchin, I.V. Denisov, V.A. Sedov, N.A. Rybalchenko // Proc. SPIE. — 2005. — Vol. 5851. — P. 263–266.*

☎ (4232) 31-04-39

e-mail: Kulchin@hq.febras.ru

igordenisov@delphin.marine.su

nelly@msun.ru □

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РЕСУРСАМИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОБЩНОСТИ¹

И. Л. Артемьева, Т. Л. Гаврилова, В. В. Грибова, А. С. Клещев, М. А. Князева,
Н. Ю. Никифорова, В. А. Орлов, М. Ю. Черняховская, Е. А. Шалфеева

Рассмотрен подход к решению проблемы управления созданием, хранением и поддержкой в актуальном состоянии информационных ресурсов, а также обеспечением доступа к ним не только пользователей, но и программ через сеть Интернет.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия было выдвинуто несколько перспективных проектов, развитие которых, после демонстрации потенциальных преимуществ, затормозилось. Самым старым из них является проект массового создания экспертных систем, более новыми — проекты семантического Интернета и агент-ориентированного программирования. Практическое использование научных результатов, полученных при выполнении этих проектов, пока проблематично.

Система, основанная на знаниях, состоит из двух частей — оболочки и базы знаний, а экспертная система — основанная на знаниях система, база знаний которой имеет высокий уровень компетентности. В начале 1980-х гг. казалось, что массовой разработке практически полезных экспертных систем препятствует недостаточная производительность компьютеров. Однако настоящим камнем преткновения для этой технологии оказалась высокая трудоемкость создания и сопровождения компетентных баз знаний. Система, основанная на знаниях, без гарантий компетентности ее базы знаний и сопровождения разработчиков (поддержания на современном уровне) в течение достаточно длительного времени, не имеет шансов быть коммерческим продуктом. Главная проблема — кто и как будет создавать и сопровождать компетентные базы знаний для экспертных систем.

¹ Работа выполнена при финансовом содействии программы № 16 Президиума РАН, проект «Теоретические основы интеллектуальных систем, основанных на онтологиях, для интеллектуальной поддержки научных исследований», и программы № 16 ОЭМПУ РАН, проект «Синтез интеллектуальных систем управления базами знаний и базами данных».

Интернет уже давно стал огромным хранилищем полезной информации, ориентированным на людей. Однако чем больше такой информации в Интернете, тем труднее найти в этом хранилище релевантную информацию. Проект семантического Интернета направлен на решение этой проблемы путем хранения в Интернете онтологий, в терминах которых представлена информация, и благодаря унификации ее представления. Однако и здесь возникла похожая проблема — кто и как будет создавать и сопровождать онтологии и обеспечивать унифицированное представление информации в Интернете.

Проект агент-ориентированного программирования направлен на массовую разработку агентов — программ, функционирующих в сети Интернет, способных взаимодействовать друг с другом и выполняющих полезную работу по заданиям других агентов. Взаимодействие агентов также должно осуществляться в терминах онтологий, хранящихся в Интернет. И здесь возникает та же проблема, что и для семантического Интернета.

Решение этих проблем можно найти, если воспользоваться двумя основополагающими принципами [1, 2]:

- информацию в Интернете следует представлять таким образом, чтобы она была в равной мере доступна как людям, так и компьютерным программам;
- процессы создания и сопровождения информационных ресурсов следует считать самостоятельными, не связанными с процессами их обработки.

В настоящей работе рассматривается подход к проблеме управления информационными ресурсами, основанный на этих принципах.



1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОБЩНОСТИ

Под информационными ресурсами различных уровней общности будем понимать языки спецификации онтологий (вообще говоря, любые искусственные языки), онтологии различных уровней общности (онтологии верхнего уровня; метаонтологии; онтологии предметных областей; онтологии знаний и данных и т. п.), знания и данные [3].

Традиционным средством представления информации являются искусственные языки, обладающие конкретным синтаксисом, задаваемым грамматикой, и точной семантикой, задаваемой, как правило, неформально. Простейшим из них является вербальное представление. Будем называть информацию (некоторую идею) вербализуемой, если она может быть представлена в виде отображения некоторого конечного множества терминов в множество значений. Само такое представление (отображение) будем называть вербальным представлением информации. Неявное определение смысла терминов, использованных в вербальном представлении информации, может быть дано с помощью концептуализации — множества всех имеющих смысл (несущих информацию) вербальных представлений с этим множеством терминов. Явное представление концептуализации называется онтологией [4]. Явное представление некоторого собственного бесконечного подмножества концептуализации называется знаниями о совокупности информации, представляемой этим подмножеством.

Для любого искусственного языка может быть определен абстрактный синтаксис, в терминах которого может быть представлен любой текст на этом языке. Такое представление есть вербальное представление этого текста. Таким образом, любая информация, представляемая на некотором искусственном языке, является вербализуемой.

Информационные ресурсы различных уровней общности образуют некоторую иерархию [3]. На ее верхнем уровне находится описание вербального представления в терминах самого этого представления. В терминах этого же представления может быть описан абстрактный синтаксис любого искусственного языка. В терминах абстрактного синтаксиса достаточно мощного языка спецификации онтологий может быть описана любая онтология. В терминах онтологий более высокого уровня общности могут быть описаны онтологии менее высокого уровня общности. В терминах онтологий знаний могут быть описаны базы знаний, а в терминах онтологий данных (схем баз данных) — базы данных. Кроме того, базы знаний могут рассматриваться как описания некоторых совокупностей информации в вербальном представлении.

2. УПРАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РЕСУРСАМИ

Под управлением информационными ресурсами различных уровней общности в настоящей работе понимается деятельность по созданию и хранению информационных ресурсов, поддержанию их на современном уровне, а также организации к ним доступа всех заинтересованных лиц. Главная проблема — найти разумный компромисс между централизацией и децентрализацией этой деятельности. Централизация управления информационными ресурсами делает эту деятельность неудобной для ее участников, а децентрализация ведет к снижению качества информационных ресурсов.

В качестве метафоры для управления информационными ресурсами можно рассматривать научную деятельность. Наука имеет дело с информационными ресурсами различных уровней общности — научными диалектами языка деловой прозы, системами понятий различных уровней общности, системами знаний и данных. Научное сообщество децентрализовано — оно разбросано по разным странам, институтам и лабораториям. Децентрализованно создаваемые информационные ресурсы (например, научные статьи) становятся доступными научному сообществу через научные журналы, редакционные коллегии которых централизованно обеспечивают необходимый научный уровень и новизну этих ресурсов. Монографии и учебники представляют собой согласованное объединение этих информационных ресурсов в единых системах понятий и на принятых научных диалектах. Журналы и научные издательства являются центрами распространения научной информации, а библиотеки — ее централизованными хранилищами. Эта метафора была положена в основу прототипа Интернет-системы управления информационными ресурсами различных уровней общности (Многоцелевого банка знаний), которая в настоящее время проходит испытания и вводится в эксплуатацию в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН [3].

Все информационные ресурсы, которые управляются средствами системы, физически находятся на выделенном сервере. На верхнем уровне иерархии эти ресурсы объединены в крупные единицы — специализированные банки знаний. Администратор системы принимает решение о создании новых специализированных банков знаний при наличии заинтересованных и компетентных пользователей.

Каждый специализированный банк знаний состоит из основной и экспериментальной областей (студенческий банк — только из экспериментальной области). В основной области находятся проверенные информационные ресурсы, доступные для обработки компьютерными программами. В экспериментальной области ресурсы создаются и

модифицируются. Решение о переводе ресурсов из экспериментальной в основную область (их публикации) принимает администратор специализированного банка знаний по результатам их проверки и оценки качества. Кроме того, каждый специализированный банк знаний состоит из разделов, число и названия которых определяет администратор этого банка.

Связь пользователей с администраторами осуществляется через сайт Многоцелевого банка знаний. Пользователи запрашивают необходимые им полномочия на создание, редактирование или использование информационных ресурсов банка, а соответствующий администратор наделяет их этими полномочиями через административную систему, проверяя необходимый для этого уровень компетенции пользователей.

Создание, редактирование и просмотр информационных ресурсов осуществляются через специализированные редакторы [5]. Использование таких редакторов возможно только в соответствии с полномочиями, которыми наделил пользователя администратор. Каждый такой редактор связан с парой информационных ресурсов, находящихся на соседних уровнях иерархии. В терминах информации верхнего уровня (управляющей информацией) редактируется информация нижнего уровня (целевая информация). Универсальный редактор Многоцелевого банка знаний связывается с некоторой управляющей информацией и, в результате, становится специализированным редактором связанной с ним целевой информации. Чтобы создать новый информационный ресурс, пользователь должен запросить на это полномочие и указать управляющую информацию, в терминах которой он будет формировать этот ресурс. Чтобы редактировать и просматривать информацию, достаточно указать только целевую информацию — управляющая информация определяется единственным образом.

Создание и редактирование информации возможно в двух режимах — в режиме инженера знаний, когда пользователю доступны все возможности универсального редактора, и в режиме эксперта, когда пользователь обеспечивается интеллектуальной поддержкой, связанной с управляющей информацией. В режиме инженера знаний пользователь создает и редактирует целевую информацию, которая в дальнейшем будет использоваться как управляющая. При этом он связывает с этой информацией спецификацию определенной интеллектуальной поддержки (тексты помощи, ограничения целостности (контекстные условия), процедуры выбора элементов и подмножеств из множеств. В режиме эксперта пользователь получает контекстную помощь, возможность выбора элементов и подмножеств из соответствующих множеств. Целевая информация контролируется на соответствие ограничениям целостности. В обоих режимах возможны ссылки на другие элементы ре-

дактируемой информации, а также элементы других информационных ресурсов. Кроме того, целевая информация, созданная в режиме эксперта, может редактироваться в режиме инженера знаний, чтобы затем использоваться в качестве управляющей.

3. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

Каждый специализированный редактор представляет собой универсальный редактор Многоцелевого банка знаний, интерпретирующий соответствующую управляющую информацию. Все информационные ресурсы, создаваемые такими редакторами, представлены в одном и том же универсальном представлении. Универсальная оболочка информационных ресурсов Многоцелевого банка знаний есть набор операций над информацией в этом представлении в терминах этого представления. Интернет-программа получает доступ к информационному ресурсу Многоцелевого банка знаний через оболочку, если она наделена необходимыми полномочиями.

Если информационный ресурс создан в терминах одной онтологии (управляющей информацией), а должен обрабатываться в терминах другой, то программа обработки должна предварительно решить задачу интерпретации — перевода информации из одной терминологии в другую.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Информационные ресурсы специализированных банков знаний используются при решении прикладных задач. Решатели прикладных задач являются программными компонентами специализированных банков знаний. Они имеют доступ к информации специализированного банка через набор операций универсальной оболочки. При решении прикладной задачи могут использоваться информационные ресурсы других специализированных банков знаний, если решатель прикладной задачи наделен такими полномочиями. Различным группам пользователей специализированного банка знаний может требоваться свой набор информации из этого банка, который определяется областью профессиональной деятельности пользователей данной группы. Например, информационные ресурсы специализированного банка знаний по химии могут включать в себя знания физической, органической, аналитической и других разделов химии. При решении прикладных задач одного раздела химии используются только знания этого раздела, но могут потребоваться и все информационные ресурсы специализированного банка. В этом случае пользователь специализированного банка знаний может получить доступ к требуемому ему набору информационных ресурсов



посредством своего автоматизированного рабочего места, входящего в набор программных средств специализированного банка знаний.

5. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ БАНКИ ЗНАНИЙ

В настоящее время в рамках Многоцелевого банка знаний начата разработка специализированных банков знаний, предназначенных для решения прикладных задач в предметных областях, — «математика», «химия», «медицина», «преобразование программ», а также для реализации пользовательских интерфейсов программных средств с локальной и распределенной архитектурой, с использованием программных средств Многоцелевого компьютерного банка знаний.

Специализированный банк математических знаний [6—8] предназначен для накопления математических знаний, а также для обучения студентов их формализации и доказательству теорем с помощью компьютеров. Информационное наполнение банка содержит системы аксиом, определения, теоремы и их доказательства, отнесенные к различным разделам математики. Программное наполнение банка состоит из автоматизированного рабочего места студента, включающего в себя редактор математических знаний, подсистемы автоматического и автоматизированного конструирования доказательств и их визуализации.

Специализированный банк знаний в области медицинской диагностики [9] предназначен для поддержки медицинского образования, медицинских научных исследований, медицинских консультаций и дистанционной диагностики заболеваний. Информационное наполнение банка знаний в области медицинской диагностики включает в себя модель онтологии медицинской диагностики, базы наблюдений и базы заболеваний различных разделов медицины, а также архивы историй болезни. Программное наполнение банка знаний включает в себя редакторы баз наблюдений, знаний о заболеваниях и историй болезни, а также программы оптимизации этих баз и программы медицинской диагностики, предполагающие применение высокопроизводительных вычислительных систем для повышения эффективности логических рассуждений [10].

Специализированный банк знаний по химии [11—13] предназначен для решения прикладных задач с использованием ее онтологии и знаний. Информационные ресурсы банка содержат модель онтологии химии и согласованную с онтологией базу знаний. Программные компоненты — это редакторы информационного наполнения и программы для решения прикладных задач. Классы прикладных задач, которые пользователь может решать с помощью специализированного банка, определяются содержанием модели онтологии и

базы знаний. Примеры: нахождение пути синтеза химических соединений; предсказание физико-химических свойств соединений; определение класса химического элемента, соединения или реакции по описанию свойств объекта классификации; вычисление значений различных характеристик химического процесса в любой момент процесса; проверка непротиворечивости знаний и онтологии относительно результатов химических экспериментов. Первая версия специализированного банка знаний по химии содержит модель онтологии физической и органической химии в объеме университетского курса, а также модели онтологии некоторых разделов аналитической химии.

Общая задача специализированного банка знаний по преобразованиям компьютерных программ [14] заключается в накоплении знаний о преобразованиях программ, а также в обеспечении возможностей проведения компьютерных экспериментов в науке, поддержке активных форм обучения студентов в образовании и макетировании оптимизирующих и распараллеливающих компиляторов в профессиональной деятельности. Информационное наполнение банка состоит из онтологии: знаний о преобразованиях программ; языков программирования; онтологии модели структурных программ; а также баз знаний о преобразованиях программ, архива программ и историй их преобразований. Программное наполнение банка включает в себя средства редактирования информационного наполнения; управляемые базами знаний преобразователи программ, средства визуализации историй преобразований программ и генераторы объектного кода на различные платформы. Также в программное наполнение входит инструментальное средство построения макетов оптимизирующих компиляторов.

Специализированный банк знаний о пользовательском интерфейсе [15] предназначен для проектирования и реализации пользовательских интерфейсов прикладных программ в Многоцелевом банке знаний на основе его информационных ресурсов. Проектирование интерфейса представляет собой разработку его модели средствами редакторов банка. Далее по этой модели автоматически генерируется пользовательский интерфейс, который связывается с соответствующей прикладной программой. Компоненты модели интерфейса — модель системы понятий предметной области, модель прикладной программы, модель выразительных средств интерфейса, модель сценария диалога, а также модели взаимосвязей между ними. Каждый компонент, за исключением модели предметной области, формируется на основе соответствующей универсальной онтологии, хранящейся в банке. Модель системы понятий предметной области является информационным ресурсом того специализированного банка, для которого разрабатывается прикладная программа.

6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО И ПРОГРАММНОГО НАПОЛНЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ БАНКОВ ЗНАНИЙ

Как уже отмечено, каждый специализированный банк знаний (за исключением студенческого) состоит из основной и экспериментальной областей. Перевод информационных и программных ресурсов из экспериментальной в основную область возможен только в том случае, если их качество удовлетворяет предъявляемым требованиям. Поэтому в рамках работ по созданию и исследованию методов и средств управления информационными ресурсами разрабатываются модели, методы и средства контроля качества информационных и программных ресурсов.

Поскольку специализированные банки предназначены для накопления таких информационных ресурсов (данных, знаний, онтологий и спецификаций языков), которыми можно многократно пользоваться, то необходимо своевременное их оценивание. Важно предоставить создателям информационных ресурсов возможность обнаружить в них дефекты и проконтролировать некоторые свойства моделей данных, знаний, онтологий и языков, тем самым, предоставляя пользователям ресурсов некоторые гарантии проверенности хранимой информации. Особенно важна проверка онтологий и языков, поскольку в их терминах формируется большая часть ресурсов банка. В основе оценивания онтологий положена универсальная классификация их свойств, обеспечивающая систематический подход к оцениванию ресурсов различных уровней общности.

Для оценивания качества программных ресурсов разработана процедура испытаний программного наполнения специализированных банков знаний, определяющая порядок проверки программного обеспечения на соответствие его спецификациям. Перевод программных ресурсов в основные области банков знаний должен осуществляться только в случае успешного их оценивания в соответствии с данной процедурой. В настоящее время проводятся испытания прототипа системы управления информационными ресурсами. Результатами этих испытаний, помимо выявленных дефектов, станут методика испытаний, формы документов по представлению результатов таких испытаний и сами эти документы. Методика испытаний, формы документов и результаты испытаний могут быть полезны при испытаниях следующих версий системы и других подобных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная система управления информационными ресурсами различных уровней общности состоит из набора средств для создания, со-

проведения и использования информационных ресурсов в Интернете. В системе предусмотрено совмещение централизованного управления информационными ресурсами через администраторов (создание специализированных банков знаний и их разделов, перенос информации из экспериментальной в основную область, наделение пользователей и программ необходимыми полномочиями) и децентрализованного управления этими ресурсами со стороны остальных пользователей системы (создание и редактирование ресурсов, программ их обработки). Разработка системы — первый этап программы работ, направленной на создание и коллективное использование в Интернете информационных ресурсов различных уровней общности, а также программ для их обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клещев А. С., Черняховская М. Ю. Современное состояние компьютерной обработки знаний // Сб. науч. тр. — Владивосток, 2001. — С. 273—284.
2. Kleshchev A. S., Artemjeva I. L. Domain ontologies and knowledge processing. Technical Report 7—99, Vladivostok: IACP FEBRAS, — 1999. — P. 25.
3. Орлов В. А., Клещев А. С. Многоцелевой банк знаний. Ч. 1. Концепция и политика. — Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2003. — 40 с.
4. Uschold M. Knowledge Level Modeling: Concepts and Terminology // The Knowledge Engineering Review. — 1998. — Vol. 13:1. — P. 5—29.
5. Орлов В. А., Клещев А. С. Многоцелевой банк знаний. Ч. 3. Концепция универсального редактора ИРУО. — Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2003. — 28 с.
6. Гаврилова Т. Л., Клещев А. С. Анализ подходов к решению проблемы правильности математических знаний // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 13—19.
7. Гаврилова Т. Л., Клещев А. С. Проблема конструирования правильных интуитивных доказательств в классических аксиоматических системах. Конструирование полных доказательств. — Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2003. — 24 с.
8. Гаврилова Т. Л., Клещев А. С. Проблема конструирования правильных интуитивных доказательств в классических аксиоматических системах. Модель интуитивного доказательства. — Там же. — 18 с.
9. Черняховская М. Ю. Представление знаний в экспертных системах медицинской диагностики. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. — 212 с.
10. Москаленко Ф. М. Экспертная система медицинской диагностики, основанная на реальной онтологии медицины, для многопроцессорной ЭВМ // Тр. II Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» / Ин-т пробл. упр. — М., 2004. — С. 999—1084.
11. Артемьева И. Л., Цветников В. А. Фрагмент онтологии физической химии и его модель // Электронный журн. «Исследовано в России». — 2002. — № 3. — С. 454—474. <<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/042.pdf>>.
12. Артемьева И. Л., Рештаненко Н. В. Модульная модель онтологии органической химии // Информатика и системы управления. — 2004. — № 2.
13. Артемьева И. Л., Рештаненко Н. В. Специализированный компьютерный банк знаний предметной области «Химия» // Искусственный интеллект. — 2004. — Т. 1. — С. 235—244.
14. Князева М. А. Банк знаний о преобразованиях компьютерных программ // Там же. — Т. 3. — С. 179—186.
15. Gribova V. V., Kleshchev A. S. From an ontology-oriented approach conception to user interface development // International Journal Information theories & applications. — 2003. — Vol. 10, N 1. — P. 87—94.

☎ (4232) 31-04-24

e-mail: kleshchev@iacp.dvo.ru





ЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЛИЗМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунько

Рассмотрена логическая модель высоковольтной подстанции с точки зрения распространения по ней собственных электромагнитных излучений элементов оборудования. Данные мониторинга электромагнитных излучений используются для диагностики технического состояния элементов оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование текущего технического состояния ответственного электротехнического высоковольтного оборудования (ВВО) является одной из актуальнейших задач современности. Основная масса ВВО в стране смонтирована лет 35–45 назад и к началу XXI века в значительной степени исчерпала свой технический ресурс. Фактически в настоящее время ни один из методов диагностики не дает ответа на вопрос о реальной оценке остаточного ресурса ВВО. Приобретает особое значение разработка методов ранней первичной диагностики высоковольтного оборудования под рабочим напряжением, которые обладали бы малой трудоемкостью и позволяли выявлять единицы оборудования с аномальными характеристиками без дополнительных отключений, при минимальном вмешательстве в технологический процесс передачи энергии [1].

Нормальная работа ВВО сопровождается собственным электромагнитным излучением (ЭМИ) в широком диапазоне частот, которое можно явно обнаружить при эксплуатации элементов оборудования (например, силовых и измерительных трансформаторов либо в целом, либо по отдельным фазам) в рабочих режимах подстанции (ПС). Со второй половины 1990-х гг. в лаборатории электрофизики и электроэнергетики ИАПУ ведутся исследования в направлении оценки и прогнозирования текущего технического состояния ВВО.

Свойства спектров ЭМИ практически не изучены, однако, например, с научной и технической достоверностью можно утверждать, что повышение энергии и амплитуды спектров коррелирован-

но с ухудшением технического состояния изоляции, что узкие “пики” свидетельствуют о возникновении высокочастотных колебаний, что число таких пиков также коррелирует с техническим состоянием изоляции и т. д. Таким образом, будем говорить о некоторых свойствах спектра в целом как признаках технического состояния элементов ВВО. В этом контексте формализованное описание на языке наличия либо отсутствия некоторых свойств позволяет подняться на достаточно высокий уровень обобщения и единообразным способом описывать разнородную семантическую информацию, отражающую реальные свойства сигнала. При наблюдении спектров ЭМИ на ПС фиксируется, в конечном итоге, набор их свойств, которые могут передаваться от одного элемента оборудования (ЭО) к другому как по штатным электрическим соединениям на ПС, так и по эфиру между близрасположенными ЭО. Собственные электромагнитные излучения ВВО рассматриваются как канал информации о техническом состоянии элементов оборудования, и эти данные используются для дальнейшего диагностического обследования и организации ремонтного обслуживания. Такого рода ЭМИ, налагаясь друг на друга, создают общую электромагнитную обстановку на ПС [2].

Для решения возникающих практических задач необходимо располагать моделью распространения ЭМИ по ПС и принципами распознавания свойств ЭМИ отдельных источников на фоне регистрируемой общей электромагнитной обстановки (диагностики свойств источников). Настоящая статья посвящена этим проблемам.

1. ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для описания и анализа процессов распространения ЭМИ на подстанции как объекте диагностирования будем пользоваться моделью, построенной на основе частично ориентированного графа ПС. Основная идея модели изложена в работе [3]. Введем ряд формальных обозначений.

Обозначим множество всех узлов графа через $V = \{V_i\}, i = 1, \dots, v$. Множество узлов соединенных ветвями, образуют граф $G = G(V)$. Множество узлов разбивается на три подмножества:

$S \subseteq V$ — узлы, ассоциированные с ЭО — источниками ЭМИ ($|S| = s$);

$P \subseteq V$ — узлы, образующие вместе с источниками ЭМИ электрическую схему ПС;

$M \subseteq V$ — узлы, ассоциированные с точками регистрации ЭМИ на территории ПС.

С ветвями графа ассоциируются пути распространения ЭМИ. Ветви графа имеют двойственную природу. В качестве способов распространения сигнала рассматриваются два. Первый — через непосредственные электрические связи (ветви графа формируются на основе электрической схемы соединения элементов оборудования). Эти связи между ЭО в конкретном рабочем режиме на ПС зависят от схемы включения ЭО; они известны в момент проведения экспериментов. Второй способ распространения сигнала — путем непосредственного излучения электромагнитных волн в эфир элементами оборудования; в этом случае основой для построения ветвей графа служит анализ пространственно-геометрического расположения ЭО, являющихся источниками ЭМИ. Ясно, что связь между элементами каждой пары ЭО симметрична, т. е. сигнал может распространяться от любого из пары элементов ко второму — в любом направлении.

Таким образом, некоторые пары узлов графа $(V_k, V_j) \in (P \cup S) \subseteq V$ соединены неориентированными ветвями, и эта связь отражается предикатом:

$$\forall V_k \in (P \cup S) \exists V_j \in (P \cup S) G(V_k, V_j, \theta); \quad (1)$$

где θ — неориентированная ветвь.

С другой стороны, ветви графа, ассоциированные с точками наблюдения $V_k \in M$, имеют явно выраженную ориентацию. Очевидно, что сигналы ЭМИ могут распространяться лишь от ЭО к точке наблюдения; сама же по себе эта точка (т. е. расположенные в соответствующем месте ПС измерительные приборы) не должна и не может быть источниками ЭМИ на ПС. Узлы $V_k \in M$ являются тупиковыми вершинами и соединены с узлами множества $(P \cup S)$ направленными ветвями.

Аналогично выражению (1) формально это выражается так:

$$\forall (V_k, V_j) V_k \in M, V_j \in [(P \cup S) \setminus M], \\ G(V_k, V_j, \eta) \wedge G(V_j, V_k, \xi).$$

Здесь через η и ξ , соответственно, обозначены конец и начало ориентированной ветви.

Ясно, что $S \cap P = \emptyset$. Для простоты положим, что множество M не пересекается с множествами S и P ($M \cap (P \cup S) = \emptyset$). В некоторых случаях можно считать, что сигнал регистрируется непосредственно у некоторых ЭО. Тогда можно переопределить множество M ; впрочем, никаких дополнительных проблем при анализе этот случай не представляет.

2. МАТРИЧНОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФА ПОДСТАНЦИИ

При формальном анализе рассматриваемых задач необходимо ввести матричное описание графа. Обычно полная информация о графе дается матрицей инцидентий A , строки которой соответствуют узлам графа, а столбцы — ветвям, а элементами ее являются $\{1, -1, 0\}$. В качестве первичного матричного описания графа введем в рассмотрение матрицу смежности узлов D . Поскольку ориентация ветвей связана лишь с узлами — точками наблюдений, в соответствии с разбиением $V = S \cup P \cup M$ представим матрицу D в блочном виде:

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_k \in S & V_k \in P & V_k \in M \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_k \in S \\ V_k \in P \\ V_k \in M \end{matrix} & \begin{bmatrix} D_{SS} & D_{SP} & D_{SM} \\ D_{PS} & D_{PP} & D_{PM} \\ D_{MS} & D_{MP} & D_{MM} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

Верхняя левая подматрица из 2×2 блоков соответствует неориентированной части графа и не отличается от обычной матрицы смежности узлов, а правое и нижнее окаймление соответствует ориентированной части. Элементы матрицы $D = \{d_{jk}\}$ представляют собой 0 или 1 в соответствии с правилами:

$$\begin{aligned} \forall (V_k, V_j) \in (S \cup P) G(V_k, V_j, \theta) &\Rightarrow d_{kj} = d_{jk} = 1; \\ \forall (V_k, V_j) \in (S \cup P) -G(V_k, V_j, \theta) &\Rightarrow d_{kj} = d_{jk} = 0; \\ \forall V_k \in (S \cup P) V_j \in M G(V_k, V_j, \xi) &\Rightarrow d_{kj} = 1; \quad (3) \\ \forall V_k \in M V_j \in V V_j \neq V_k &\Rightarrow d_{kj} = 0; \\ \forall (V_k, V_k) &\Rightarrow d_{kk} = 1. \end{aligned}$$



3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель построения графа состоит в анализе распространения сигналов ЭМИ от источников к точкам наблюдения. Для спектров сигналов и результатов наблюдений имеем обычную связь:

$$\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{K}(\omega)\mathbf{E}(\omega), \quad \omega \in \Omega, \quad (4)$$

где Ω — множество частот, для которых производится анализ; $\mathbf{E}(\omega)$ и $\mathbf{U}(\omega)$ — векторы модулей спектров источников и сигналов, соответственно; $\mathbf{K}(\omega)$ — матрица коэффициентов передачи надлежащих размеров.

Аналогично множеству частот спектров источников Ω в выражении (4) введем в рассмотрение множество свойств источников ЭМИ $\{\sigma_r\}$, $r = 1, \dots, f$. При наличии свойства σ_r в спектре ЭМИ источника E_i принимается, что $E_{ir} = 1$, и $E_{ir} = 0$ в противном случае.

В результате введем в рассмотрение матрицы $\mathbf{E} = [E_{ir}]$ и $\mathbf{U} = [U_{jr}]$, ($i = 1, \dots, s$, $j = 1, \dots, m$) — наличия свойства σ_r у источников и зарегистрированных сигналов, соответственно. Коэффициент передачи $\mathbf{K}(\omega)$ отражает частотные свойства приемной антенны и реальные условия распространения сигнала, в том числе — взаимное геометрическое расположение источника, точек наблюдения и окружающих конструкций. Вводится матрица \mathbf{K} коэффициентов передачи (влияния) свойств по графу; эта матрица в общем случае зависит от передаваемого свойства σ_r (например, передача ЭМИ в верхней и нижней частях диапазона может отличаться на порядки).

Распространение каждого из свойств σ_j формально описывается логической формулой: $\mathbf{U}_r = \mathbf{K}_r \mathbf{E}_r$, $r = 1, \dots, f$, связывающей между собой свойства источников ЭМИ и свойства наблюдаемых сигналов.

Здесь: $\mathbf{E}_r = \text{col}[E_{ir}]$, $i = 1, \dots, s$ — вектор наличия свойства r в источниках; $\mathbf{U}_r = \text{col}[U_{jr}]$, $j = 1, \dots, m$ — вектор наличия свойства r в наблюдаемых сигналах; \mathbf{K}_r — матрица коэффициентов передачи свойства r .

Одна из целей анализа графа ПС заключается в формальном построении матрицы влияния \mathbf{K} .

Практика показывает, что индивидуальные сигналы ЭМИ, генерируемые элементами оборудования, при распространении на подстанции затухают. В этой связи необходимо ввести меру расстояния между соответствующими узлами графа ПС. В качестве этой меры можно принять длину пути между узлами графа и считать, что сам сигнал (или его некоторые свойства) проявляются на рас-

стоянии от источника, не большем некоторой заданной величины.

Из теории графов известно, что матрица количества путей длины l между узлами графа задается соответствующей степенью матрицы смежности узлов (имеющей на главной диагонали нули): \mathbf{D}^l . Если же на главной диагонали расположены "1" (в соответствии с правилами (3)), то матрица \mathbf{D}^l дает информацию о количестве путей длины не более l между узлами, и она, вычисленная по правилам булевой арифметики, даст требуемую матрицу путей длины не более l .

Исходя из матрицы (2), используя блочное представление, нетрудно записать рекуррентные формулы для вычисления матрицы путей:

$$\mathbf{D}^l = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \mathbf{D}_{SS}^l & \mathbf{D}_{SP}^l & \mathbf{D}_{SM}^l \\ \hline \mathbf{D}_{PS}^l & \mathbf{D}_{PP}^l & \mathbf{D}_{PM}^l \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \hline \end{array}, \quad (5)$$

(заметим, что надстрочный индекс l у блочных подматриц следует воспринимать лишь как индекс, а не показатель степени).

Когда наблюдение сигналов ЭМИ возможно во всех узлах графа ПС, получим матрицу $\mathbf{K}(l)$ из первой блок-строки:

$$\mathbf{K}(l) = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \mathbf{D}_{SS}^l & \mathbf{D}_{SP}^l & \mathbf{D}_{SM}^l \\ \hline \end{array}^T \quad (6)$$

Здесь, как обычно, верхний индекс T означает транспонирование матрицы.

4. ПРИМЕР

Поясним изложенное на примере (рис. 1). Рассмотрим фрагмент подстанции, включающий в себя три трансформатора, четыре выключателя и системы шин. Фрагмент ПС на рис. 1 изображен, как принято, в однолинейном изображении. В то же время источником дефекта, и, следовательно, ЭМИ, может являться каждая фаза по отдельности. Когда пространственное расположение отдельных фаз позволяет экспериментально различать их собственные ЭМИ, граф ПС должен строиться на основе полной (трехфазной) электрической схемы. В тех случаях, когда имеет смысл (или есть возможность) представлять, что в трехфазном устройстве возможен лишь единственный дефект, в основу графа ПС можно положить однолинейную электрическую схему ПС или ее фрагмента. С другой стороны, если, к примеру, на ПС применена группа однофазных трансформаторов, то здесь нет

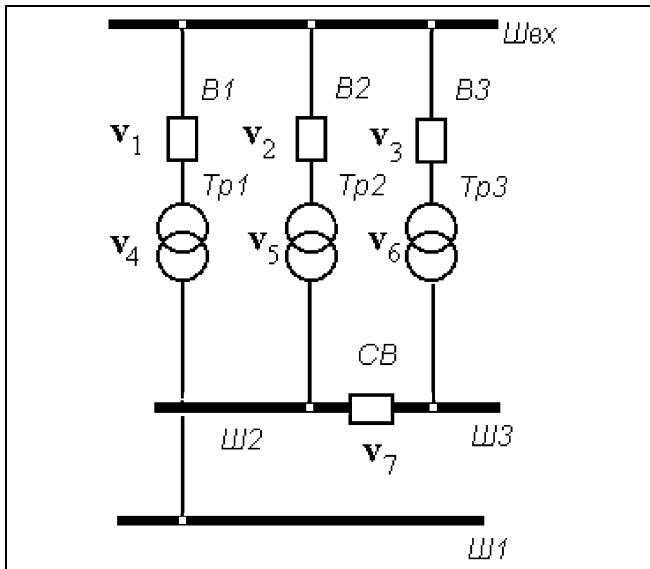


Рис. 1. Схема фрагмента подстанции

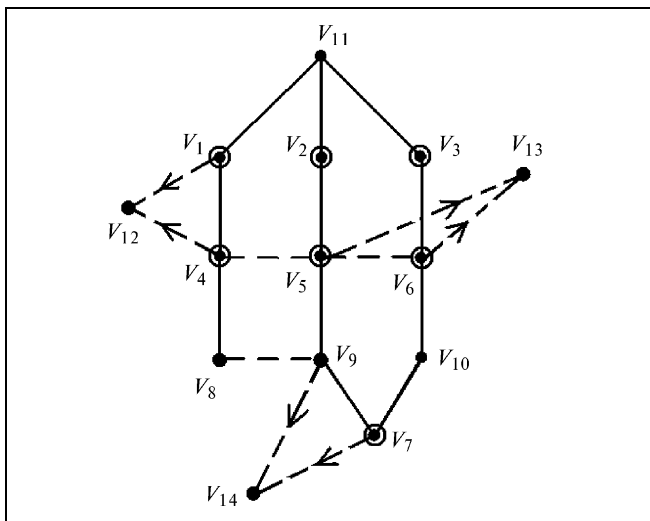


Рис. 2. Граф фрагмента подстанции

выбора — граф ПС должен строиться на основе полной трехфазной схемы. В рассматриваемом примере шины будем считать пассивными элементами.

Приведем граф для иллюстрации правил его построения и покажем процедуру использования графа для анализа состояний ЭО. Выполним следующие шаги:

- сформируем узлы V_i — источники ЭМИ;
- введем в графе ветви, соответствующие непосредственным электрическим связям между ЭО и связям посредством ЭМИ (отмеченные пунктиром) (рис. 2).

Считаем, к примеру, что непосредственные связи элементов посредством ЭМИ имеются у пар:

соседних трансформаторов ($Tr1, Tr2$), ($Tr2, Tr3$) и соседних шин ($Ш1, Ш2$).

Итак, сформируем множество узлов $\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7\}$ (выключатели и трансформаторы на рис. 2 для наглядности выделены) — источники ЭМИ, $\{V_8, V_9, V_{10}, V_{11}\}$ (шины) — пассивные элементы. Введем в графе ветви, соответствующие непосредственным электрическим связям между ЭО и назовем связи посредством ЭМИ ($V_4 - V_5$, $V_5 - V_6$, $V_8 - V_9$, отмечены пунктиром). Добавим еще узлы — точки наблюдения $\{V_{12}, V_{13}, V_{14}\}$, непосредственно не связанные ни с одним единственным ЭО. Реальные наблюдения в этих точках являются логической суммой ЭМИ нескольких источников.

Учитывая, что $S = \{1...7\}$, $P = \{8...11\}$, $M = \{12...14\}$, можно построить матрицу смежности, и по формулам (5) и (6) матрицы влияния $K(1)$ и $K(2)$ предстанут в виде:

$$K(1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$K(2) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$



Пусть 7 источников заданы своими 8-ю свойствами, и эти данные представлены таблицей:

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	
E_1	1	0	1	0	0	0	0	1	E_1
E_2	1	1	0	0	0	0	0	0	E_2
E_3	1	0	0	1	0	0	0	1	E_3
E_4	0	0	0	1	0	1	0	0	E_4
E_5	0	1	0	0	1	0	0	0	E_5
E_6	0	0	1	0	0	0	0	0	E_6
E_7	1	0	0	0	1	0	1	0	E_7

Тогда в узлах графа можно зарегистрировать свойства, представленные матрицами $U(1) = K(1)$ и $U(2) = K(2)$, соответствующие матрицам влияния $K(1)$ и $K(2)$:

$$U(1) = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix},$$

$$U(2) = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix}.$$

5. ДИАГНОСТИКА СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ

Обратная задача — диагностика свойств источников на основе зарегистрированных наблюдений — представляет особый интерес. Очевидно,

что гарантировать единственное решение или даже какое-либо решение вообще для такой задачи невозможно. Имея в виду, что матрица измерений U получена на основе логического произведения матриц:

$$U_{jr} = \bigvee_{i=1}^s (K_{ji} \& E_{ir}),$$

для решения обратной задачи сформулируем два не требующих доказательства правила.

Правило 1 (“0” — анализ):

Если в j -м узле свойство r не наблюдается, то в его l -окрестности Ω_j^l все источники не имеют этого свойства:

$$\forall (U_{jr} = 0 \& K_{ji}(l) = 1) \Rightarrow E_{ir} = 0.$$

Правило 2 (“1” — анализ):

Если во всей l -окрестности i -го узла Ω_i^l наблюдается свойство r , а все источники не имеют этого свойства, $k \in \Omega_i^l, k \neq i$, то свойство r присуще источнику i :

$$(\forall j \in \Omega_i^l U_{jr} = 1) \& (\forall k \in \Omega_i^l k \neq i, E_{kr} = 0) \Rightarrow E_{ir} = 1.$$

Обратимся к примеру. Итак, считаем здесь известным, что ЭМИ описываются 8-ю свойствами и источниками ЭМИ являются узлы $\{V_1, \dots, V_7\}$.

Исходными данными для решения двух вариантов обратной задачи являются матрицы $U(1)$ и $U(2)$, полученные ранее в результате численного эксперимента, и матрицы влияния $K(1)$ и $K(2)$.

Подготовим две пустые (не заполненных ни нулями, ни единицами) — для двух вариантов расчета — заготовки матрицы E . Применив правило 1, внесем в матрицы полученные нулевые элементы. После этого применим правило 2 и добавим полученные единичные элементы. Оставшиеся незаполненными клетки матрицы пометим знаком “X”, обозначающим элемент с неопределенным значением. В результате получим матрицы E_{01} и E_{02} :

$$E_{01} = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 0 & 1 & X & 0 & 0 & 0 & 1 \\ X & 1 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix},$$

$$E_{02} = \begin{matrix} \begin{matrix} X & X & X & X & X & 0 & 0 & 1 \\ X & X & X & X & X & 1 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & X & 0 & 0 & 1 \\ X & X & X & X & X & 1 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & X & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix}$$

В результате решения обратной задачи видно, что при $l = 1$ имеется возможность полностью оценить источники по свойствам 5, 6, 7, 8, и частично — по свойствам 1, 2, 3, 4; при $l = 2$ — по свойствам 6, 7, 8 и частично — по свойствам 3, 4. Если расстояние распространения сигналов превышает 1, то свойства источников 1, 2 и 5 не диагностируются вообще. В этой ситуации свойства 1, 2 и 5 оказываются неинформативными для задачи диагностики элементов ВВО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная формальная модель может развиваться в следующих направлениях:

- анализ реального взаимовлияния ЭМИ источников на объекте, т. е. выяснение реальных

расстояний l распространения, характерных для конкретных условий и свойств сигналов;

- с практической точки зрения очень важны две задачи минимизации:
 - необходимых точек измерений;
 - конкретизация наблюдаемых свойств ЭМИ источников в функции точки измерений — выявление наиболее информативных индивидуальных свойств ЭМИ источников, которые при дальнейшем мониторинге будут предметом специального внимания обслуживающего персонала.

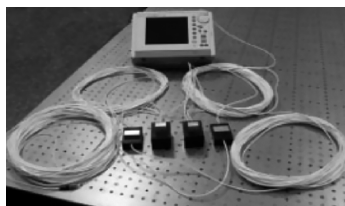
ЛИТЕРАТУРА

1. Кинит Н. В. и др. Техническая диагностика и мониторинг мощных энергетических установок по полям их излучений // Автометрия. — 2003. — № 6. — С. 86–97.
2. Кинит Н. В., Кац М. А. Диагностика точечных источников электромагнитных шумов // Электричество. — 1999. — № 4. — С. 40–42.
3. Кинит Н. В., Преображенская О. В., Петрунько Н. Н. Логический анализ электрической подстанции как объекта диагностирования // Известия РАН. Сер. Энергетика. — 2001. — № 2. — С. 57–67.

☎ (4232) 31-06-64

e-mail: kin@dvo.ru

pnn@dvo.ru



РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

для дистанционного мониторинга полосы отчуждения подземных трубопроводов, линий телекоммуникаций, электрических кабелей, а также для мониторинга иных охраняемых периметров

Область применения

Система предназначена для удаленного мониторинга охраняемых периметров, включая полосы отчуждения подземных трубопроводов, телекоммуникационных, электрических кабелей и др. В частности, система может применяться для обнаружения строительной техники в зоне прокладки трубопровода (кабеля) с целью предупреждения несанкционированных строительно-монтажных работ, представляющих опасность для контролируемого объекта. Система может применяться для предупреждения незаконного проникновения на охраняемые объекты.

Краткое описание

Конструктивно система состоит из блока обработки информации и протяженной волоконно-оптической линии, размещаемой на некоторой глубине под землей. На волоконно-оптической линии размещены амплитудные измерительные преобразователи, которые служат для регистрации давления на грунт, создаваемого крупной строительной техникой или иными объектами в контролируемой зоне. Система позволяет объединить в своем составе до нескольких тысяч измерительных преобразователей, мультиплексирование которых осуществляется на основе методов оптиче-

ской временной рефлектометрии, что позволяет за время менее 1 мин вывести на удаленный терминал информацию о местоположении и массе обнаруженной в контролируемой полосе отчуждения единицы строительной техники или иного объекта. Система невосприимчива к электромагнитным помехам и устойчива к агрессивному воздействию внешней среды.

Технические характеристики

Пороговая чувствительность измерительных преобразователей, кг	0,5
Погрешность регистрации местоположения обнаруженного объекта, м	1
Максимальная длина контрольно-измерительной линии, км	160
Время опроса контрольно-измерительной системы, мин	Менее 1
Число измерительных преобразователей в составе контрольно-измерительной системы	До 3000

Степень освоения разработки — опытный образец.

Предложения к сотрудничеству:

- разработка экспериментальных контрольно-измерительных систем по заявкам потребителей;
- освоение промышленного производства.



Институт автоматки и процессов управления ДВО РАН

690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5;

☎ (4232) 31-04-39

• e-mail: director@iacp.dvo.ru

• www.iacp.dvo.ru



CONTENTS & ABSTRACTS

INSTITUTE FOR AUTOMATION AND CONTROL
PROCESSES OF FAR-EASTERN BRANCH
OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES IS 35. 2

METHODS AND ALGORITHMS FOR
PARAMETRIC SYNTHESIS OF STOCHASTIC
SYSTEMS 3

Abramov O. V.

The problem of synthesizing analog engineering systems with deterministic structure and random parameters is considered. The extended concept of parametric synthesis is introduced that results in a parameters control strategy ensuring desirable or optimum reliability characteristics of the synthesized system. Several algorithms for multivariate analysis and optimization using parallel and distributed processing techniques are discussed.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION
OF SYNTHESIS METHODS FOR HIGH-PRECISION
CONTROL SYSTEMS OF COMPOUND
DYNAMIC OBJECTS UNDER PARAMETRIC
UNCERTAINTY 9

Filaretov V. F.

The paper examines the control problem of compound nonlinear dynamic objects with time variables, uncertain parameters, and environmental effects. A unified approach and a several original methods are proposed for synthesizing multilevel self-tuning, adaptive and robust control systems that ensure high control performance. Simulation results have confirmed the operability and high effectiveness of the synthesized control systems under uncertainties and essential variability of the dynamic objects' parameters.

LOGIC-DYNAMICAL APPROACH TO BILINEAR
SYSTEMS DIAGNOSIS 20

Zhirabok A. N., Letenko A. A.

A logic-dynamical approach is suggested as a tool to diagnose dynamical systems described by bilinear models. The approach includes the following actions: bilinear component transformation to the desirable form, elimination of the transformed bilinear component, observer design for the obtained linear model with some additional constraints, and transformation of the derived linear observer to the bilinear one.

SEQUENTIAL SYNTHESIS OF A ROBUST
MULTI-LOOP PID CONTROLLER
FOR A REACTIVE DISTILLATION COLUMN 26

Torgashov A. Yu.

A sequential synthesis procedure for decentralized (multi-loop) PID controllers based on the estimation of control

loops interaction in the form of multiplicative plant uncertainty is proposed. The paper shows that each synthesis iteration is accompanied by the correction of robust performance criteria for the coupled SISO systems. The results of industrial application of the proposed sequential design to a reactive distillation unit are discussed and the comparative analysis with other techniques is included.

AN INTERNAL MODEL OF MATHEMATICAL
PRACTICE FOR INTERACTIVE SYSTEMS
OF THEOREM PROOF CONSTRUCTION.
PART 1. GENERAL MODEL DESCRIPTION. 32

Gavrilova T. L., Kleschev A. S.

A model of mathematical practice is offered for developing interactive systems of correct proofs construction for mathematical statements on the basis of mathematical knowledge. This model is more adequate than mathematical logic models. The model of the mathematical practice is represented as a combination of two models. The first one is an internal model, i.e., a formal system. The second one is an external model. In the framework of the external model, a mathematician can control the process of intuitive proofs construction. Requirements to the external and internal models of the mathematical practice are formulated. A generic description of the internal model is included.

A DOMAIN-INDEPENDENT ONTOLOGY-DRIVEN
TEXT GENERATOR 36

Gribova V. V.

The method of text generation by the output data of a software application is presented. The output data is an unordered set of the relation tuples of a relational database. The paper describes the key concept of the approach, the ontology controlling the text generator, a text generation a model, and a method for the approach implementation.

EXPERT JUDGMENTS ABOUT BASIC
SITUATIONAL MODELS OF COLLECTIVE
MOVEMENTS OF SHIPS. 43

Dorozhko V. M., Lebedeva A. N.

The paper analyzes the system of expert judgments about collective movement of ships. The analysis is based on the technology of collective movement of the ships splitting into basic information structures that have the generality and representativeness of characteristics. The situational analysis of safe navigation dataware problem is undertaken with the case studies of two and three ships and ship caravans.

SOLVABILITY INVESTIGATION FOR SATELLITE ORBIT DETERMINATION PROBLEM BASED ON MEASUREMENTS50**Devyatisil'ny A. S. and Kislov D. E.**

A method for observation problem solvability evaluation under finite accuracy of model representation caused by computational environment limitations is offered. Numerical experiment results illustrating the method's effectiveness are presented.

ON THE PROBLEM OF INERTIAL NAVIGATOR ALIGNMENT ON IMMOVABLE MOUNT UNDER GRAVITATIONAL UNCERTAINTY54**Devyatisil'ny A. S. and Chislov K. A.**

The imbedding of the space gravimetry problem into the problem of 3D inertial navigation system alignment is discussed. Models and results of computational experiments are adduced.

PERCEPTRON APPLICATION IN NONLINEAR RECONSTRUCTION TOMOGRAPHY59**Kulchin Yu. N., Denisov I. V., Panov A. V., Rybal'chenko N. A.**

The principles of solving nonlinear reconstruction tomography problems by means of perceptron-type neural net-

works are discussed. The paper describes the features of such neural networks that enable considerable improvement of computation efficiency in physical fields reconstruction for technical and technological objects. Neural network implementation technique based on multilayered perceptron is offered, and possible applications are reviewed.

AN INTERDISCIPLINARY SYSTEM FOR INFORMATION RESOURCES MANAGEMENT AT VARIOUS GENERALITY LEVELS64**Artemieva I. L., Gavrilova T. L., Gribova V. V., et al.**

An approach to information resources management problem is discussed. Information resources management at various generality levels is understood as an activity for creating, storing and updating information resources and providing the access to them for authorized persons and software through the Internet.

LOGICAL FORMALISMS OF DATA PROCESSING FOR ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT OF HV SUBSTATION69**Kinsht N. V., Petrun'ko N. N.**

A logical model of a high-voltage substation is developed from the equipment electromagnetic self-radiation viewpoint. Electromagnetic radiation monitoring data are used for condition diagnosis of equipment pieces.

6-Я АЗИАТСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ

Очередная Азиатская конференция по проблемам управления (The 6th Asian Control Conference ASCC'2006) состоялась 18—21 июля 2006 г. в г. Бали, Индонезия).

Международные научные конференции по проблемам управления стран Азиатско-тихоокеанского региона проводятся по инициативе и под патронажем Международной федерации по автоматическому управлению (IFAC), начиная с 1994 г. Аналогичные конференции проходят в Европе и Америке. Первые конференции с интервалом в три года состоялись в Японии (Токио, 1994), Южной Кореи (Сеул, 1997) и КНР (Шанхай, 2000). На шанхайской конференции было принято решение проводить конференции раз в два года. Следующая 4-я конференция состоялась в 2002 г. в Сингапуре, а 5-я в 2004 г. в Мельбурне.

Организатором 6-й конференции стал Бандунгский технологический институт. В число организаторов конференции вошли IFAC и ряд других международных научных организаций и объединений — IEEE, ICASE, Engineers и др. Оргкомитет конференции возглавлял профессор *Harijono Tjokronegoro* (Бандунгский технологический институт). В международный программный комитет конференции входило 46 человек из различных стран Азии, а также ряд ведущих ученых Европы и США.

На конференции было представлено около 200 докладов, которые были заслушаны на заседаниях секций и отдельном заседании для стендовых докладов. Кроме того, для участников и гостей конференции было прочитано 6 лекций (проблемных докладов).

Были учреждены и вручены премии за лучшие теоретическую и прикладную работы и за лучший стендовый доклад.

Труды конференции, куда вошли полные тексты всех докладов, опубликованы в электронном виде на компакт-диске.

В докладах отражены практически все направления современной теории автоматического управления и регулирования, а также широкий круг ее приложений. Значительное внимание уделено вопросам управления в условиях неопределенности (нечеткие модели, модели с неопределенными коэффициентами и структурой, интервальные модели, робастные методы управления и оптимизации), а также управлению с использованием алгоритмов прогноза.

В целом конференция явилась заметным событием для ученых и разработчиков, работающих в области проектирования и создания систем управления.

С материалами 6-й Азиатской конференции по проблемам управления можно ознакомиться на сайте ASCC'2006: www.ascc2006.com.