

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10(194)  
2012

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

КАФЕДРЕ САПР МГТУ им. Н. Э. БАУМАНА — 30 ЛЕТ

- Норенков И. П.** Научные исследования кафедры "Системы автоматизированного проектирования" МГТУ им. Н. Э. Баумана и развитие информационных технологий . . . . . 2
- Трудоношин В. А.** Эволюция средств моделирования динамических систем. . . . 4
- Маничев В. Б., Жук Д. М., Сахаров М. К.** SADEL — Си-библиотека для решения алгебраических и дифференциальных уравнений с максимально возможной компьютерной точностью . . . . . 7
- Артеменко Ю. Н., Волкоморов С. В., Карпенко А. П., Мартынюк В. А., Пашенко В. Н., Темерев К. А., Шарыгин А. В.** Многосекционный манипулятор параллельной структуры для управления ориентацией космической обсерватории "Миллиметр" . . . . . 14
- Норенков И. П., Уваров М. Ю.** Семантический анализ текстовых документов. . . . 22
- Божко А. Н.** Моделирование позиционных связей в механических системах . . . 27
- Афиногенов Е. И., Волосатова Т. М., Сельвесюк Н. И., Чичварин Н. В.** Системный подход к проектированию алгоритмов информационно-управляющей системы летательного аппарата с учетом противодействия информационным подсистемам . . . . . 34
- Жук Д. М., Перфильев С. А.** Системы автоматизированного проектирования в хирургии — CAS-системы . . . . . 44

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Левин В. И.** Логико-автоматная теория множеств . . . . . 48
- Балакирев Н. Е., Полицына Е. В., Мозина Е. В.** Инструмент прогнозирования времени обработки в системе автоматизированного анализа текста . . . . . 59

### СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

- Вознюк М. А., Дворников С. В., Винокуров М. Е., Петросян А. П., Романенко П. Г.** Работа линий радиосвязи с ППРЧ в условиях преднамеренных помех . . . . . 64

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Асадов Х. Г., Гашимов Дж. Г.** Общая теория энтропийной фильтрации сигналов дистанционного зондирования текстурных объектов . . . . . 68
- Contents** . . . . . 71
- Приложение. Бобков С. П., Косарев И. М.** Методы повышения производительности вычислительных систем

Главный редактор  
НОРЕНКОВ И. П.

Зам. гл. редактора  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Редакционная  
коллегия:

- АВДОШИН С. М.  
АНТОНОВ Б. И.  
БАРСКИЙ А. Б.  
БОЖКО А. Н.  
ВАСЕНИН В. А.  
ГАЛУШКИН А. И.  
ГЛОРИОЗОВ Е. Л.  
ДОМРАЧЕВ В. Г.  
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш.  
ЗАРУБИН В. С.  
ИВАННИКОВ А. Д.  
ИСАЕНКО Р. О.  
КОЛИН К. К.  
КУЛАГИН В. П.  
КУРЕЙЧИК В. М.  
ЛЬВОВИЧ Я. Е.  
МАЛЬЦЕВ П. П.  
МЕДВЕДЕВ Н. В.  
МИХАЙЛОВ Б. М.  
НЕЧАЕВ В. В.  
ПАВЛОВ В. В.  
ПУЗАНКОВ Д. В.  
РЯБОВ Г. Г.  
СОКОЛОВ Б. В.  
СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.  
УСКОВ В. Л.  
ФОМИЧЕВ В. А.  
ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф.  
ШИЛОВ В. В.

Редакция:

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

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.  
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.  
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

**И. П. Норенков**, д-р техн. наук, проф.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: norenkov@rk6.bmstu.ru

### **Научные исследования кафедры "Системы автоматизированного проектирования" МГТУ им. Н. Э. Баумана и развитие информационных технологий**

Подборка статей, представляемая в данной рубрике, посвящена юбилею одной из первых в стране кафедр систем автоматизированного проектирования — кафедры САПР МГТУ им. Н. Э. Баумана. Кафедра САПР МГТУ им. Н. Э. Баумана неформально является ведущей кафедрой по специальности "Системы автоматизированного проектирования" в России, при ее активном участии разрабатывались образовательные программы и Федеральные государственные образовательные стандарты как второго, так и третьего поколений по направлению "Информатика и вычислительная техника", преподавателями этой кафедры написана основная учебная литература по САПР в нашей стране.

Кафедра образована в 1982 г., ее основу составила группа ученых и преподавателей, занимавшаяся с начала 60-х годов прошлого века вопросами автоматизации проектирования. В 1987 г. в МГТУ им. Н. Э. Баумана впервые осуществлен прием студентов на обучение по специальности "Системы автоматизированного проектирования", а в 1993 г. первые выпускники кафедры влились в число специалистов, работающих в промышленности по развитию и внедрению новых информационных технологий.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана научная деятельность, направленная на развитие автоматизации проектирования и информационных технологий, имеет давнюю, почти пятидесятилетнюю историю. Именно с работ, выполненных в МГТУ им. Н. Э. Баумана (в то время МГТУ именовался МВТУ) представителями будущей кафедры САПР, в СССР начались исследования в области систематического применения компьютеров в процессах проектирования.

Рассмотрим, какое место занимали работы, выполненные в МВТУ на кафедре САПР, в общей проблеме автоматизации проектирования.

Автоматизация проектирования, как новое научно-техническое направление, возникло в начале

60-х годов прошлого столетия применительно к электронным устройствам и системам, поскольку именно в электронике быстро росла сложность проектных задач, а работающие в этой отрасли специалисты были в наибольшей мере готовы к восприятию и применению компьютерных технологий. В то время в арсенал инструментов проектирования изделий радиоэлектроники входили главным образом средства экспериментального исследования и разработки. Имеющиеся расчетные методы были представлены приближенными соотношениями, применимыми лишь в отдельных частных случаях сравнительно простых электронных схем. Однако неавтоматизированные технологии проектирования на основе лишь физического макетирования не могли обеспечить прогресс радиоэлектроники, сопровождавшийся быстрым ростом сложности изделий.

Поэтому в ряде стран и, в первую очередь, в США и СССР были начаты работы по применению ЭВМ для решения проектных задач, положившие начало автоматизации проектирования или, как тогда говорили, машинного проектирования. Эти работы применительно к радиоэлектронике разделились на две крупные ветви, относящиеся к проектированию, во-первых, радиоэлектронных систем, во-вторых, их элементной базы. Разрабатывались модели и методы для схематехнического, функционального и конструкторского проектирования.

Первоначально усилия создателей новой технологии проектных работ сосредоточились на проблемах схематехнического проектирования, о чем свидетельствует первый специализированный выпуск трудов Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (США), посвященный автоматизации проектирования [1]. Вопросы автоматизированного проектирования систем были рассмотрены в более позднем тематическом выпуске трудов Института [2]. В США первыми программами анализа электронных схем стали NET-1 (1962 г.), ЕСАР (1964 г.), SCEPTRE (1967 г.) [3].

Параллельно с работами американских коллег и независимо от них аналогичные исследования были начаты в МВТУ им. Н. Э. Баумана, где в 1965 г. была создана первая в СССР программа анализа электронных схем ПАЭС [4]. Для применения в ПАЭС были разработаны математические модели транзисторов, диодов, трансформаторов, был предложен метод формирования математических моделей электронных схем с учетом разреженности матриц коэффициентов [5].

Интерес к новым методам расчета и исследования электронных схем заметно возрос в конце 60-х годов в связи с появлением и развитием микроэлект-

роники, поскольку применение экспериментальных методов при разработке интегральных схем весьма ограничено. Методы автоматизированного проектирования становятся безальтернативными. Разработки МВТУ нашли применение в созданной в НИИ молекулярной электроники системе автоматизированного проектирования интегральных схем, отмеченной в 1975 г. Государственной премией СССР. В состав коллектива разработчиков, возглавляемого Г. Г. Казенновым, вошли сотрудники МВТУ Б. В. Анисимов и И. П. Норенков.

В последующие годы работы МВТУ по развитию программного обеспечения для моделирования технических объектов привели к созданию ряда новых программ анализа [6—9]. Для этих программ были разработаны неявно-явные схемы интегрирования систем дифференциальных уравнений [10], специальные методы ускоренного анализа многопериодных процессов [11], методы решения систем дифференциальных уравнений с плохообусловленными матрицами Якоби [12], снижающие вероятность получения ошибочных решений при моделировании динамических процессов и, главное, при наличии неправильных результатов обеспечивающие предупреждение пользователя о некорректности решений.

Важнейшим достижением явилось распространение разработанной технологии анализа электронных схем на моделирование объектов механической и смешанной физической природы [13], реализованное в программных комплексах ПА6 и ПА9 и предвосхитившее появление в дальнейшем методологии многоаспектного моделирования, международного стандарта VHDL-AMS и других средств смешанного (mixed-mode) моделирования, таких как системы Adams, AMESim, MathModelica и т. п. Появление методологии многоаспектного моделирования позволило начать преподавание основ автоматизированного проектирования студентам всех факультетов МВТУ и обусловило образование в МВТУ кафедры САПР.

Методы и средства моделирования составляют основу систем САЕ — компьютерных систем инженерных расчетов, но в процессе проектирования не менее важная роль отводится математическому и программному обеспечению оптимизации и синтеза проектных решений. В области оптимизации параметров технических систем на кафедре САПР осуществлена оригинальная постановка задач на основе использования критерия минимального запаса работоспособности [14], разработан нашедший широкое применение генетический метод комбинирования эвристик [15], предложены постановка и методы решения многокритериальных задач оптимизации [16].

Возможности формализации творческих процедур структурного синтеза схем и конструкций проектируемых изделий связаны с созданием и развитием интеллектуальных систем проектирования.

На кафедре САПР для систем поддержки принятия проектных решений разрабатываются природные алгоритмы поиска проектных решений [15, 17], предложены метод ролевой кластеризации онтологий [18], комбинаторно-логическая модель структурного синтеза [19], прямой адаптивный метод многокритериальной оптимизации на основе нейросетевой аппроксимации функции предпочтения лица, принимающего решение [20].

Автоматизация проектирования — одна из наиболее наукоемких информационных технологий. Методы решения задач, создаваемые для САПР, находят применение и во многих смежных областях. Одной из них является информатизация образования. Заметную роль исследования, проводимые на кафедре САПР, сыграли в развитии автоматизированных обучающих систем (АОС). Впервые предложено построение АОС и инструментальных средств синтеза электронных учебников и учебных пособий на основе онтологического подхода [21]. В соответствии с этим подходом разработана оригинальная технология разделяемых единиц контента, реализованная в созданной АОС БиГОР [22]. Обеспечен доступ пользователей сети Интернет к базе образовательных ресурсов системы БиГОР, включающей совокупность учебных пособий по дисциплинам в области информационных технологий.

Все более актуальным становится применение информационных технологий в медицине. Областью, смежной с САПР по характеру математического обеспечения, является автоматизация моделирования и проектирования хирургических операций. Исследования постановок и методов решения задач в системах CAS (Computer Aided Surgery) также вошли в число научных интересов кафедры САПР [23].

Приводимые далее статьи данной рубрики характеризуют основные научные исследования, выполняемые на кафедре САПР МГТУ им. Н. Э. Баумана в настоящее время.

#### Список литературы

1. **Proceeding** of the IEEE. 1967. Vol. 55. N 11.
2. **Proceeding** of the IEEE. 1972. Vol. 60. N 1.
3. **Dawson D. F., Kuo F. F., Magnuson W. G.** Computer-Aided Design of Electronic Circuits — A User's Viewpoint // *Proceeding of the IEEE*. 1967. Vol. 55. N 11. P. 1946—1954.
4. **Норенков И. П.** Метод цифрового моделирования схем ЭЦВМ и его использование при проектировании ЭЦВМ // XXI Всесоюзная научная сессия, посвященная 70-летию изобретения радио. М.: НТОРЭС им. А. С. Попова. 1965. С. 3—8.
5. **Норенков И. П.** Метод сканирования M-матрицы для моделирования сложных интегральных схем // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1973. № 6. С. 108—114.
6. **Жук Д. М., Маничев В. Б., Норенков И. П.** Структура и принципы организации программного комплекса ПА-4 // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1976. № 6. С. 84—86.
7. **Мартынюк В. А., Норенков И. П., Трудоношин В. А., Федорук В. Г.** Программный комплекс для анализа БИС // *Микроэлектроника и полупроводниковые приборы*. М.: Радио и связь. 1984. Вып. 8. С. 163—171.
8. **Норенков И. П., Уваров М. Ю., Трудоношин В. А.** ПА9 — система моделирования сложных технических объектов // *Депозитарий электронных изданий*, № гос. регистрации. 0320701218. 2006.

9. Трудоношин В. А., Трудоношин И. В. Моделирование электромеханических систем с помощью программно-методического комплекса ПА9 // Информационные технологии, 2006, № 4. С. 10—13.

10. Норенков И. П., Жук Д. М., Маничев В. Б., Трудоношин В. А. Анализ электронных схем при совместном применении явных и неявных методов интегрирования // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1979. № 6. С. 27—31.

11. Норенков И. П., Евстифеев Ю. А., Маничев В. Б. Метод ускоренного анализа многопериодных электронных схем // Радиотехника. 1987. № 2.

12. Жук Д. М., Маничев В. Б., Ильницкий А. О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области // Информационные технологии. 2010. Часть 1. — № 7. С. 16—24; часть 2 — № 8. С. 23—26.

13. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высш. шк., 1980. 311 с.

14. Норенков И. П. Выбор критерия и метода оптимизации параметров электронных схем // Радиотехника. 1971. № 6. С. 101—102.

15. Норенков И. П. Генетические алгоритмы синтеза расписаний и планов // Межотраслевой научно-технический сборник "Техника и экономика", серия "Автоматизация проектиро-

вания". М.: ВНИИ межотраслевой информации. 1995. № 1—2. С. 11—15.

16. Карпенко А. П., Федорук В. Г. Обзор программных систем многокритериальной оптимизации. Отечественные системы // Информационные технологии. 2008. № 1. С. 15—23.

17. Воробьева Е. Ю., Карпенко А. П., Селиверстов Е. Ю. Когнитивизация алгоритмов роя частиц // Электронное научно-техническое издание "Наука и образование". 2012. № 4.

18. Норенков И. П., Уваров М. Ю. Задачи обработки знаний на основе ролевой кластеризации онтологий // Информационные технологии. 2012. № 2. С. 19—24.

19. Божко А. Н. Структурный синтез как задача дискретной оптимизации // Электронное научно-техническое издание "Наука и образование". 2010. № 9.

20. Карпенко А. П., Мухлисуллина Д. Т., Овчинников В. А. Нейросетевая аппроксимация функции предпочтений лица, принимающего решения, в задаче многокритериальной оптимизации // Информационные технологии. 2010. № 10. С. 2—9.

21. Норенков И. П. Концепция модульного учебника // Информационные технологии, 1996. № 2. С. 22—24.

22. Норенков И. П., Уваров М. Ю. База и генератор образовательных ресурсов // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 60—65.

23. Жук Д. М., Перфильев С. А. CAS системы — системы автоматизированного проектирования в хирургии // Электронное научно-техническое издание "Наука и образование". 2011. № 3.

УДК 519.622.2

**В. А. Трудоношин**, канд. техн. наук, доц.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: trudonoshin@mail.ru

## Эволюция средств моделирования динамических систем

*В системах автоматизированного проектирования важная роль отводится средствам анализа проектируемых объектов на основе моделей динамических процессов. Представлены эволюция и современное состояние программных средств моделирования технических систем и объектов на примере истории создания и развития программ анализа, разработанных на кафедре систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н. Э. Баумана.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, программы анализа, многоаспектное моделирование

В данной работе рассмотрено современное состояние программных средств моделирования технических систем и объектов, как результат эволюции математического и программного обеспечений анализа динамических систем. Рассмотрение ведется на примере истории создания и развития программ анализа на кафедре систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н. Э. Баумана, начиная с 60-х годов прошлого столетия до настоящего времени. Описываемые программы предназначены для моделирования объектов на макроуровне, под которым понимается формирование и

решение математических моделей в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

В таблице перечислены программы анализа, созданные в МГТУ им. Н. Э. Баумана за пятидесятилетнюю историю развития систем САЕ в нашей стране. Первые пять позиций в таблице занимают программы, разработанные для анализа электронных схем. Большинство последующих программ являются мультидисциплинарными, т. е. предназначены для многоаспектного моделирования динамических систем.

Первая в СССР программа анализа электронных схем (ПАЭС) [1] для ЭВМ Урал-2 разработана

Программы анализа, созданные в МГТУ им. Н. Э. Баумана

№	Название программы	Дата первой публикации	Основной разработчик	Программно-аппаратная среда	Источник
1	ПАЭС	1965	И. П. Норенков	Урал-2	[1]
2	АКИМ	1968	Б. К. Аристов	Минск-2, автокод	[2]
3	ПА-1	1972	И. П. Норенков	М-222, БЭСМ-4	[3]
4	ПА-4	1976	Д. М. Жук	М-222, БЭСМ-4	[4]
5	ПАРМ	1977	В. А. Трудоношин	ЕС ЭВМ	[5]
6	ПА-6	1981	В. Г. Федорук	ЕС ЭВМ	[6]
7	ПА-7	1989	М. Ю. Уваров	ПЭВМ ДОС	[6]
8	SimHyd	1990	А. Долгов	Правец-16	[9]
9	ПА-8	1992	В. Г. Федорук	ОС Unix	[9]
10	ПА-9	1998	М. Ю. Уваров	ОС Unix	[11]

в МВТУ им. Н. Э. Баумана И. П. Норенковым в 1963—1965 гг. Систему обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) составляли на основе метода переменных состояния вручную, но по специальной формализованной методике, обеспечивающей учет разреженности матриц коэффициентов системы уравнений. В библиотеку моделей компонентов были включены созданные для ПАЭС математические модели биполярного транзистора, полупроводникового диода, импульсного трансформатора. Для интегрирования СОДУ применяли простейший явный метод Эйлера.

Главный недостаток ПАЭС, заключавшийся в неавтоматизированном составлении математической модели, устранен в следующей программе моделирования — АКИМ, разработанной для ЭВМ Минск-2 в 1968 г. [2] В составе программного обеспечения для этой ЭВМ имелся язык АКИ (автокod инженер), его модификация — язык АКИМ — была выполнена для описания топологии и задания параметров электронных схем.

Для появившегося нового семейства ЭВМ М-222, БЭСМ-4 разрабатывается программа ПА-1 [3], в которой был реализован метод переменных состояния с автоматическим составлением математической модели схемы по описанию ее топологии.

Для этого же семейства ЭВМ Д. М. Жуком в 1976 г. разработана программа анализа электронных схем ПА-4 [4], в которой впервые были опробованы неявные методы интегрирования с блочно-диагональной матрицей коэффициентов, поскольку выяснилось, что область применения явных методов для моделирования электронных схем весьма ограничена и для жестких систем уравнений они практически не пригодны. Другой особенностью программы было ее использование для анализа электронных схем при наличии спецвоздействий и соответствующем расширении библиотеки моделей компонентов.

В 70-е годы прошлого века в Советском Союзе начинается выпуск ЭВМ третьего поколения — ЕС ЭВМ (Единая серия), прототипом для которой послужила американская серия IBM 360. Для машин этой серии в МВТУ создается программа ПАРМ [5], автором которой является В. А. Трудоношин. В программе был реализован узловый метод формирования математической модели объекта. Для интегрирования систем алгебро-дифференциальных уравнений использовался неявный метод Эйлера, для решения систем нелинейных алгебраических уравнений — метод Ньютона и для решения систем линейных алгебраических уравнений — метод  $L/U$ -разложения. Программа была построена как компилятор-загрузчик, формировались расчетные программы для обработки разреженных матриц на машинном языке и им передавалось управление для выполнения расчета.

Позднее для этого же класса ЭВМ В. Г. Федорук разработана система моделирования и оптимизации сложных технических объектов ПА-6 [6].

Система была построена по принципу классического компилятора — на языке Ассемблера формировались расчетные программы под конкретный объект, после этого вызывались системные транслятор и редактор связей (линковщик) для построения загрузочного образа. Для формирования математической модели объекта использовался узловый модифицированный метод.

В этом комплексе было реализовано много новинок того времени. Так, в ПА-6 электронная схема могла быть представлена электрическими и логическими моделями. Разработаны элементы-преобразователи логических переменных в электрические и обратно. Для анализа аналоговой части применялся неявно-явный метод второго порядка точности или неявный метод Эйлера, а для анализа логической части — модифицированный событийный метод, разработаны алгоритмы синхронизации логических и аналоговых методов анализа. Для повышения быстродействия расчетов в ПА-6 был реализован латентный подход на уровне подсхем и на уровне моделей сложных компонентов, т. е. на то время, пока состояние подсхемы или компонента не менялось во времени, его математическая модель заменялась на упрощенную экономичную [7]. Для решения системы нелинейных уравнений использовался многоуровневый метод Ньютона, в котором учитывалась различная скорость сходимости для разных подсхем. Также в комплексе был реализован метод релаксации формы сигналов [8].

Но наиболее важной особенностью ПА-6 является переход на многоаспектное моделирование. В ПА-6 впервые была обоснована целесообразность построения программно-методических комплексов моделирования и анализа на базе расширенного инвариантного ядра с открытой архитектурой, что принципиально меняло взгляды на программное обеспечение проектирующих подсистем САПР. Универсальный подход к получению математических моделей объектов, состоящих из механических, гидравлических (пневматических), электрических и тепловых подсистем на основе эквивалентных схем, собственно и послужил основой для создания кафедры САПР в МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1982 г.

Программа ПА-6 не имела в то время аналогов в мире в области моделирования сложных технических объектов с учетом взаимовлияния процессов различной физической природы при автоматическом формировании математических моделей систем. Впервые для этого комплекса были разработаны математические модели элементов различной физической природы. Так, специалистами кафедры "Литейные машины и процессы" МВТУ им. Н. Э. Баумана была разработана библиотека моделей для исследования процесса затвердевания отливок, а на кафедре "Обработка материалов давлением" ПА-6 послужила базой для создания системы моделирования динамики тяжелых механических прессов, которая продолжительное время

эксплуатировалась в Воронежском объединении тяжелых механических прессов. Комплекс ПА-6 был удостоен серебряной медали ВДНХ.

В 1985 г. появляются первые персональные ЭВМ, в частности "Правец-16" (аналог IBM XT). Для этой ЭВМ студентом-дипломником А. Долговым было написано ядро ПА-6-микро, на базе которого совместно с кафедрой гидравлики создается комплекс моделирования гидромеханических систем SimHyd [9]. Это был первый комплекс с графическим интерфейсом пользователя. В комплексе реализован расширенный узловой метод формирования математических моделей систем [10], позволяющий отделить библиотеки математических моделей элементов от библиотеки методов численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

На смену этому комплексу пришел комплекс ПА-7, разработанный М. Ю. Уваровым (1989 г.). Отличительной чертой ПА-7 являлось наличие удобного языка разработки моделей элементов, с помощью которого некоторые модели можно было разработать, не прибегая к программированию. Несмотря на то что комплекс разработан для операционной системы ДОС, в нем была реализована многозадачность — исполнялись одновременно три процесса: поддержка графического интерфейса пользователя, расчетный модуль и графический постпроцессор. Непосредственно в процессе расчета можно было изменять параметры элементов и проследить, как это повлияло на поведение объекта. Математическую основу комплекса составлял расширенный узловой метод формирования математической модели объекта.

Для Unix-систем в 1992 г. В. Г. Федоруком по заказу Министерства образования был разработан комплекс ПА-8. Графический интерфейс пользователя и постпроцессор были написаны с использованием популярной в то время библиотеки *InterViews*. Используются языки программирования C и C++. В комплексе был сохранен принцип компиляции рабочих программ на языке C с последующим вызовом стандартного транслятора для получения объектных модулей. Для написания моделей был использован тот же язык, который был реализован в комплексе ПА-7.

Развитие Интернет-технологий, разработка кросс-платформенного языка Java послужили основой для создания в 1998 г. программно-методического комплекса моделирования и оптимизации ПА-9 [11]. Комплекс реализован на языке Java, поэтому он может быть использован на любой аппаратной платформе, для которой существует виртуальная Java-машина. Принцип компиляции рабочих программ здесь также сохранен, но в несколько измененном виде — рабочие программы формируются на основе собственных байт-кодов, которые потом исполняет интерпретирующая программа. Использование языка Java позволяет использовать ПА-9 в двух вариантах: как обычное приложение и как ап-

плет-программу. Последнее обстоятельство делает ПА-9 удобным средством разработки виртуальных лабораторий. Апплет является полнофункциональной программой, в которой отсутствует функция запоминания сформированной в процессе сеанса расчетной схемы и результатов, хотя последние могут быть запомнены в виде скриншота. Для пополнения библиотеки математических моделей элементов используется специализированный язык (похожий на языки ПА-7 и ПА-8). При разработке моделей может быть использован принцип вложенности, т. е. ранее разработанная модель может служить частью вновь разрабатываемой. Для компактного графического представления схемы возможно преобразование некоторой части схемы в блок, который по необходимости может быть развернут.

Кроме временного анализа в комплексе реализован частотный и спектральный анализы, а также параметрическая оптимизация. ПА-9 успешно эксплуатируется в МГТУ им. Н. Э. Баумана в учебном процессе. Благодаря простому интуитивно понятному графическому интерфейсу студенты получают навыки работы по моделированию за одну-две лабораторные работы. ПА-9 применяют не только в учебном процессе, но и в промышленности, примером этого служит использование комплекса для моделирования динамики тяжелых механических прессов [12].

Таким образом, программы моделирования динамических систем, разработанные в МГТУ им. Н. Э. Баумана, каждая в свое время были конкурентоспособными с имевшимися отечественными и зарубежными аналогами, а по некоторым свойствам и опережали их. Так, программы 60-х годов были существенно более экономичными по затратам вычислительных ресурсов, а в программах 80-х годов впервые реализовано моделирование объектов с разнородными физическими процессами. В настоящее время в мире используется много программ многоаспектного моделирования динамических объектов, наиболее известными являются AMEsim, MathModelica, SimulationX, Simprolog и др. По характеру реализованного в них математического обеспечения эти программы близки к комплексу ПА-9. Программа ПА-9 применяется и в настоящее время при проектировании сложных объектов, кроме того, на основе методологии математического моделирования, принятой в программах серии ПА, созданы программные продукты в других организациях, например комплекс PRADIS, успешно используемый в автомобильной промышленности. Одним из направлений развития систем моделирования динамических систем является разработка методов решения систем алгебро-дифференциальных уравнений, исключающих опасность получения недостоверных решений при плохой обусловленности моделей и при многопериодном характере моделируемых процессов. Результаты, полученные на кафедре САПР в этом направлении, представлены в статье [13] настоящего выпуска.

## Список литературы

1. **Норенков И. П.** Метод цифрового моделирования схем ЭЦВМ и его использование при проектировании ЭЦВМ // XXI Всесоюзная научная сессия, посвященная 70-летию изобретения радио. М.: НТОРЭС им. А. С. Попова, 1965. С. 3—8.
2. **Анисимов Б. В., Аристов Б. К., Норенков И. П., Шерстнев В. В.** Программа получения математических моделей электронных схем и их анализа на ЦВМ // Всесоюзная межвузовская конференция по алгоритмическим методам проектирования цифровых систем. Ленинград: Изд. ЛИТМО, 1969. 76 с.
3. **Норенков И. П.** Особенности программы анализа переходных процессов в многокомпонентных интегральных схемах // Микроэлектроника. 1972. Вып 3. С. 222—225.
4. **Жук Д. М., Маничев В. Б., Норенков И. П.** Структура и принципы организации программного комплекса ПА-4 // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1976. № 6.
5. **Трудоношин В. А., Пивоваров Н. В., Подгурский В. Н.** Программа анализа электронных схем ПАРМ для ЕС ЭВМ // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1977. Т. 26. № 6.
6. **Федорук В. Г., Мартынюк В. А., Трудоношин В. А.** Реализация метода диакоптики и латентного подхода к анализу БИС в программном комплексе анализа // Проектирование элек-

тронных вычислительных машин и систем. М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1981.

7. **Трудоношин В. А., Федорук В. Г.** Исследование алгоритмов ускоренного анализа схем // Вычислительная техника в научных исследованиях и автоматизация проектно-конструкторских работ. Владимир: Изд. ВПИ, 1983.
8. **Денисенко В.** Проблемы схемотехнического моделирования КМОП БИС. URL: [http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2002\\_4\\_100.php](http://www.kit-e.ru/articles/circuit/2002_4_100.php)
9. **Густомясов А. Н., Трудоношин В. А.** Автоматизированный расчет на ЭВМ гидромашин и гидроприводов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 1991. № 2. С. 29—36.
10. **Норенков И. П., Трудоношин В. А., Федорук В. Г.** Метод формирования математических моделей для адаптируемых программных комплексов анализа радиоэлектронных схем // Радиотехника. 1986. № 9. С. 67—72.
11. **Трудоношин В. А.** Моделирование процессов с помощью системы ПА-9. URL: <http://bigor.bmstu.ru>
12. **Применение** комплекса ПА-9 для проектирования объектов машиностроения. URL: <http://wwwcdl.bmstu.ru/Press/Press.html>
13. **Маничев В. Б., Жук Д. М., Сахаров М. К.** SADEL — Си-библиотека для решения алгебраических и дифференциальных уравнений с максимально возможной компьютерной точностью // Информационные технологии. 2012. № 10. С. 7—13.

УДК 519.622.2

**В. Б. Маничев**, канд. техн. наук, доц.,  
**Д. М. Жук**, канд. техн. наук, доц.,  
**М. К. Сахаров**, студент,  
МГТУ имени Н. Э. Баумана,  
e-mail: manichev@bmstu.ru

## Введение

В статье используется следующая терминология.

*Математическая модель* — система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) или дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), отображающая функционирование моделируемой динамической системы с требуемой достоверностью и точностью.

*Математическое моделирование (modelling)* — процесс получения математических моделей на основе фундаментальных законов физики, химии и т. п.

*Компьютерная модель* — алгоритмическая и программная реализация математической модели.

*Компьютерное моделирование (simulation)* — процесс получения результатов математического моделирования с помощью компьютерных моделей.

*Жесткие системы ОДУ* — системы ОДУ со степенью жесткости более  $10^6$ .

*Плохообусловленные системы линейных алгебраических уравнений (ЛАУ)* — системы ЛАУ с числом обусловленности более  $10^6$ .

*Достоверность компьютерного моделирования* — соответствие результатов компьютерного моделирования заведомо истинным (обычно экспериментальным) результатам.

*Точность компьютерного моделирования* — степень отклонения результатов достоверного моделирования от истинных, заведомо точных результатов.

*Математическая точность (accuracy)* — относительная погрешность нормы векторов решения систем ОДУ—ДАУ и ЛАУ.

## SADEL — Си-библиотека для решения алгебраических и дифференциальных уравнений с максимально возможной компьютерной точностью

*Библиотека SADEL на языке Си для "сверхточного" (extra precision) решения систем ОДУ—ДАУ и ЛАУ является практическим результатом многолетних научно-исследовательских работ авторов в качестве математического ядра платформы математического моделирования динамических процессов для разнородных (multi-physics, multi-discipline) технических систем и объектов (программный комплекс ПА10 (SADEL-PA10)), превосходящей подобные зарубежные программные продукты MATLAB-SIMULINK, Maple-MapleSim, C-Library NAG и C-Library IMSL в части решения жестких систем ОДУ и плохообусловленных систем ЛАУ. Приведены результаты сравнительного тестирования библиотеки.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, компьютерное моделирование, системы инженерного анализа, динамические системы, обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), дифференциально-алгебраические уравнения (ДАУ), линейные алгебраические уравнения (ЛАУ), методы интегрирования

*Компьютерная точность (precision)* — количество верных значащих цифр в компьютерных вычислениях.

"Сверхточное" решение систем ОДУ—ДАУ и ЛАУ — применение методов получения "сверхточных" (extra precision) решений, реализованных в пакетах прикладных математических программ, а также в библиотеках математических программ, и описанных в документации на соответствующие пакеты и библиотеки: Maple (<http://maplesoft.com> — метод Software Floating Point (SFP-метод)), MATLAB (<http://mathworks.com> — метод Variable Precision Arithmetic (VPA-метод)), Mathematica (<http://wolfram.com> — метод Arbitrary Precision Arithmetic (APA-метод)), методов библиотеки Intel для "сверхточных" десятичных вычислений (IEEE 754-2008 Decimal Floating-Point for Intel® Architecture Processors [1]).

Программы конечно-элементного анализа (ANSYS, Nastran, SIMULIA/Abaqus и др.), основанные на численном решении систем дифференциальных уравнений в частных производных большой размерности методом конечных элементов, считаются эталоном достоверности и точности математического и компьютерного моделирования разнородных технических систем и объектов. Это утверждение не соответствует действительности в случае жестких, плохообусловленных задач. Метод конечных элементов сводится к решению систем нелинейных алгебраических уравнений (НАУ). Любая система НАУ в точке решения будет квазилинейной, ей будет соответствовать система ЛАУ с матрицей Якоби системы НАУ в качестве матрицы коэффициентов в точке решения. Конечно-элементная задача будет плохообусловленной, если матрица Якоби в точке решения будет плохообусловленной, но в этом случае в конечно-элементном анализе не решены три важных проблемы, о которых менеджеры вышеуказанных программ не говорят.

1. Считается, что уменьшение размера расчетной сетки увеличивает точность полученных результатов, но этот размер имеет ограничение снизу вследствие ошибок округления, так как при очень маленьком размере сетки (соизмеримым с компьютерной точностью простых арифметических операций) для плохообусловленных задач будут получены качественно недостоверные результаты.

2. Для решения систем НАУ в программах конечно-элементного анализа используют различные итерационные методы, которые для плохообусловленных задач не дадут и трех-четыре верных знаков в решении, например, для линейных алгебраических уравнений с матрицей Гильберта в качестве матрицы коэффициентов, если в точке решения не использовать методы "сверхточных" вычислений.

3. Динамический конечно-элементный анализ сводится к решению систем ОДУ, которое для жестких систем ОДУ требует использования неявных методов интегрирования, они, в свою очередь, сводятся к решению большого числа систем НАУ на каждом шаге численного интегрирования систем ОДУ, и конечное решение жестких систем ОДУ может быть неверным при использовании указанных приближенных итерационных методов.

К счастью, подавляющее большинство практических задач конечно-элементного анализа хорошо обусловлены (диагональные элементы матрицы Якоби по абсолютной величине преобладают над недиагональными элементами).

Наши исследования показали, что главным недостатком реализации вычислительных методов, используемых для анализа динамических процессов при проектировании и управлении в известных программных комплексах моделирования динамических систем, является возможная выдача ошибочных результатов компьютерных вычислений для жестких систем ОДУ и плохообусловленных систем ЛАУ без предупреждения пользователей об их недостоверности. Библиотека SADEL (Sets of Algebraic and Differential Equations solvers Library) разработана как библиотека "сверхточных" решателей для жестких систем ДАУ и плохообусловленных систем ЛАУ и предназначена для решения указанных проблем [2, 3].

### **Обоснование принципов разработки библиотеки SADEL**

Численное решение дифференциальных уравнений во многих численных методах их решения сводится к многократному численному решению соответствующих систем алгебраических уравнений [4]. Высокий порядок таких систем и необходимость их многократного решения в процессе математического моделирования предъявляют жесткие требования к эффективности применяемых численных методов решения систем ОДУ—ДАУ и ЛАУ. Эффективность численных методов решения таких уравнений включает в себя два аспекта:

- точность получаемых решений данных уравнений;
- затраты машинного времени и оперативной памяти на получение решений.

Быстрый рост производительности вычислительной техники (особенно производительности процессоров компаний Intel и NVIDIA и современных суперкомпьютеров) в последнее время выдвигает на первый план проблему получения достоверности и точности получаемых решений. Причем должна быть обеспечена гарантия получения требуемой достоверности и точности выдаваемых инженерам-проектировщикам результатов компьютерных расчетов и математического моделирова-

ния, так как ошибки в принятии проектных решений для промышленных изделий и объектов, основанных на этих результатах, стоят очень дорого. При этом надо учесть следующее.

1. Большинство инженеров-проектировщиков не являются специалистами в численных методах и программах для решения различных математических уравнений, поэтому требуемая достоверность и точность должна быть обеспечена для параметров решателей этих уравнений, рекомендуемых для этих решателей по умолчанию.

2. При базовом, начальном математическом моделировании реальных технических систем и объектов не требуется высокая математическая точность выдаваемых пользователю результатов, так как параметры математических моделей этих изделий и объектов получены, как правило, экспериментально с невысокой математической точностью. Поэтому заданная математическая точность конечных результатов моделирования по умолчанию может быть невысокой, но она должна быть гарантировано обеспечена. Большинство алгоритмов моделирования сводится к многократному решению систем ЛАУ, которое необходимо получать уже с компьютерной точностью. Аналитически эту проблему не разрешить, например, теоретически умножение квадратной матрицы с постоянными коэффициентами на обратную равно единичной матрице, но для плохо обусловленных матриц при вычислении на компьютере единичную матрицу мы не получим.

В наших работах [2, 3, 5] было показано, что для гарантии получения качественно корректного и достоверного решения систем ОДУ численный метод решения систем ОДУ должен быть *AL*-устойчивым, т. е. абсолютно (*A*) устойчивым строго в левой (*Left*) полуплоскости комплексной плоскости устойчивости методов численного решения систем ОДУ. Программная реализация *AL*-устойчивых методов в конечном итоге сводится к многократному решению соответствующих систем ЛАУ на каждом шаге численного интегрирования, что, как правило, приводит к нескольким тысячам и более обращений к программе-решателю систем ЛАУ на всем заданном отрезке численного интегрирования. *AL*-устойчивые методы 2-го и 4-го порядков точности были реализованы в программе DMAN [6]. Решение большого числа тестовых и практических задач математического и компьютерного моделирования динамических систем с помощью этой программы показало, что для получения качественно корректного решения разнообразных систем ОДУ необходимо на всех шагах численного интегрирования обеспечить решение соответствующих тысяч разнообразных систем ЛАУ с гарантированной точностью в 15 верных значащих цифр для

всех элементов вектора решений систем ЛАУ, т. е. с удвоенной точностью выполнения простых арифметических операций и элементарных математических функций для типа *double* представления вещественных чисел алгоритмического языка Си (именно с этой точностью вычисляются все элементы матриц коэффициентов этих тысяч разнообразных систем ЛАУ).

Тестирование показало, что в известных программах-решателях систем ЛАУ эта задача не решена. Итерационные численные методы решения систем ЛАУ не решают эту проблему, так как не могут гарантировать указанную выше точность получаемых решений для всех элементов вектора решений систем ЛАУ [7]. Нам удалось решить эту проблему с помощью точных, прямых численных методов решения систем ЛАУ и указанных выше методов получения "сверхточных" (*extra precision*) решений, реализованных в математических пакетах и библиотеках программ [2].

### Программа решения систем ДАУ

В известных программах-решателях систем ОДУ—ДАУ используются три классические постановки задач решения систем ОДУ—ДАУ.

1. Нормальная форма Коши в координатном базисе переменных состояния (явная форма):

$$dX/dt = F(X, t),$$

где  $X$  — вектор дифференциальных переменных координатного базиса переменных состояния размерностью  $m$ ;  $F$  — вектор-функция правых частей системы ОДУ размерностью  $m$ ;  $t$  — независимая переменная (обычно — время).

Заданы начальные условия  $X_0 = X(0)$  и отрезок интегрирования  $t = [0, TK]$ , где  $TK$  — заданный временной отрезок интегрирования.

2. Дифференциально-алгебраическая форма разных индексов в полном координатном базисе (полужавная форма):

$$\begin{cases} dX/dt = F(X, Y, t), \\ G(X, Y) = 0, \end{cases}$$

где  $Y$  — вектор алгебраических переменных полного координатного базиса размерностью  $k$ ;  $G$  — вектор-функция размерностью  $k$ . Заданы согласованные начальные условия:  $X_0 = X(0)$ ,  $Y_0 = Y(0)$  и отрезок интегрирования  $t = [0, TK]$ .

3. Дифференциально-алгебраическая форма в полном координатном базисе (неявная форма):

$$G(X, dX/dt, Y, t) = 0, \quad (1)$$

где  $G$  — вектор-функция размерностью  $m + k$ . Заданы согласованные начальные условия и отрезок интегрирования.

Задача (1) поставлена в полном координатном базисе Л. Петзолд в 1982 г. и была разработана знаменитая программа DASS (Differential Algebraic Systems Solver) на основе метода BDF (Backward Differential Formula) [14].

Задача решения систем ДАУ в расширенном координатном базисе была поставлена в статье [8]:

$$G(PX, X, Y, t) = 0, \quad (2)$$

где  $PX = dX/dt$  — вектор производных дифференциальных переменных по времени для расширенного координатного базиса размерностью  $m$ ;  $G$  — вектор-функция размерностью  $m + k$ ; а общее число неизвестных  $2m + k$ . Заданы начальные условия  $X_0 = X(0)$  и отрезок интегрирования.

Решатель систем ДАУ в библиотеке SADEL решает системы ДАУ в расширенном координатном базисе именно в этой постановке. Были разработаны формулы  $s$ -стадийных неявных методов интегрирования систем ДАУ вида (2) в расширенном координатном базисе [9]:

$$H_i(PX_{ij}, X_i, X_{n-1}, X_{n-1}, h_n) = \\ = h_n \sum_{j=1}^s d_{ij}PX_j - \sum_{j=1}^s a_{ij}X_j - b_iX_{n-1} - h_n c_i PX_{n-1} = 0,$$

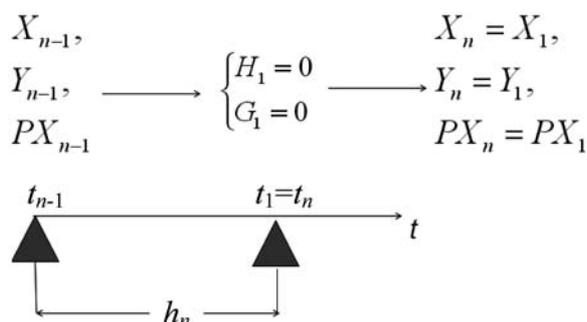


Рис. 1. Схема алгоритма неявных одностадийных одношаговых методов Эйлера и трапеций (M1 и M2 — число стадий  $s = 1$ )

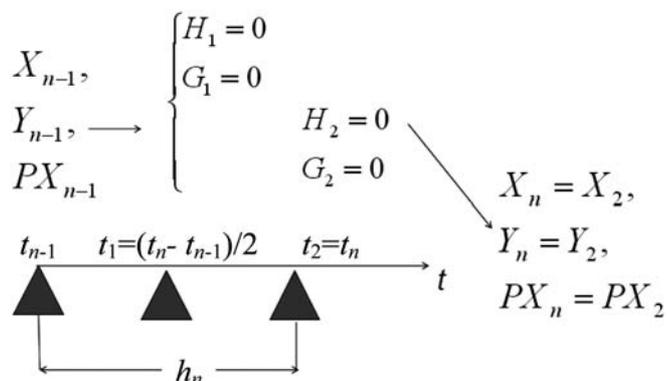


Рис. 2. Схема алгоритма неявных двухстадийных одношаговых методов (M3 — число стадий  $s = 2$ )

где  $H_i$  — вектор-функция формул интегрирования размерностью  $m$ ;  $X_n = X_s$ ;  $PX_n = PX_s$ ,  $i = 1, \dots, s$ ,  $t_n = t_s$ ;  $s$  — число стадий;  $h_n$  —  $n$ -й шаг интегрирования;  $d_{ij}$ ,  $a_{ij}$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  — параметры метода.

На основе этих формул были разработаны и реализованы три метода интегрирования [6]:

M1 —  $A$ -устойчивый неявный метод Эйлера 1-го порядка точности;

M2 —  $AL$ -устойчивый неявный метод 2-го порядка точности;

M3 —  $AL$ -устойчивый неявный метод 4-го порядка точности.

На рис. 1 и 2 показаны схемы работы алгоритмов для реализации этих методов, основанных на совместном решении систем нелинейных алгебраических уравнений  $G(X, Y, PX) = 0$  и систем линейных алгебраических уравнений  $H(X, PX) = 0$ , сформированных на соответствующих стадиях методов интегрирования.

### Программы решения систем ЛАУ

Классические постановки задач решения систем ЛАУ получают решения для любых невырожденных систем ЛАУ и не гарантируют компьютерной точности получаемых решений, особенно для плохо обусловленных систем ЛАУ с числом обусловленности многим больше 1. Постановка задачи "сверхточного" решения систем ЛАУ в библиотеке SADEL отличается от классических требованиями гарантированного получения решения с точностью в 15 верных значащих цифр (удвоенная точность *double precision* на языке Си) для всех элементов вектора решений систем ЛАУ.

Были разработаны три программы решения систем ЛАУ, включая плохо обусловленные, в данной постановке:

1. Решатель систем ЛАУ методом Гаусса с полными матрицами: LAE\_Solver\_01.
2. Решатель систем ЛАУ с 3-диагональными матрицами коэффициентов: LAE\_Solver\_3diag.
3. Решатель систем ЛАУ методом LU разложения с полными матрицами: LAE\_Solver\_02.

С помощью данных программ удалось решить с указанной выше точностью ряд тестовых плохо обусловленных задач, которые не решаются с данной точностью другими известными решателями систем ЛАУ из соответствующих библиотек стандартных математических программ [2]. В качестве примера рассмотрим тестовую задачу с матрицей Гильберта (*Hilbert matrix*) 10-го порядка в качестве матрицы коэффициентов системы ЛАУ [10]. Все элементы матрицы коэффициентов и вектора правых частей как суммы соответствующих строк матрицы коэффициентов были вычислены с удвоенной точностью. Абсолютно точное решение такой за-

дачи — единичный вектор. При решении с удвоенной точностью на языке Си тестовой задачи с матрицей Гильберта 10-го порядка с помощью решателя систем ЛАУ библиотеки MAGMA (LAPACK-Linpack) был получен следующий результат:

1,000000000**464697** 0,9999999**60244827**  
 1,000000**840984605** 0,99999**2393461859**  
 1,0000**36137385782** 0,9999**00979283788**  
 1,000**162025520190** 0,999**843779478675**  
 1,0000**81852296234** 0,9999**82030574678**

Полужирным курсивом выделены неверные значащие цифры в решении. Соответствующие программы с полными матрицами из библиотеки SADEL получили единичный вектор для этой тестовой задачи с точностью в 15 верных значащих цифр.

### Результаты сравнительного тестирования решателей ОДУ—ДАУ

Сравнение решателя систем ДАУ в библиотеке SADEL с аналогичными зарубежными решателями систем ОДУ—ДАУ проведено для параметров интегрирования решателей систем ОДУ—ДАУ, рекомендуемых для этих решателей по умолчанию. Все решатели систем ОДУ—ДАУ сравнивались при заданной относительной точности интегрирования  $TOL = 0,001$  (в программном комплексе MATLAB это точность, задаваемая по умолчанию). В таблице приведены результаты сравнения только наиболее трудных для современных решателей ОДУ—ДАУ жестких систем ОДУ с многопериодным решением.

В таблице сравнивались только методы интегрирования соответствующих решателей систем ОДУ, рекомендуемые в соответствующих математических программных комплексах для решения жестких систем ОДУ—ДАУ. Знак минус означает не-

возможность получения решения или (в большинстве случаев) качественно неверный результат без всякого предупреждения о возможных ошибках. Ниже приведено краткое описание данных трудных тестов.

**ТЕСТ 1, ТЕСТ 2.** Пример расчета жесткой системы ОДУ 2-го порядка ( $MU$  — параметр жесткости) — тест Ван дер Поля [1]. Система ОДУ для этих тестов имеет вид:

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= x_2; \\ dx_2/dt &= -x_1 + MU(1 - x_1^2)x_2; \\ x_1(0) &= -1, x_2(0) = 1; \\ t &\in (0, 42MU). \end{aligned}$$

Сравнение программ было проведено для часто встречающихся на практике значений жесткости  $MU = 10^6$  и  $MU = 10^9$ .

**ТЕСТ 3, ТЕСТ 4.** Пример моделирования электронной схемы с многопериодным решением (*high Q filter circuit* — система ОДУ 5-го порядка) — тест Манничева [11]. Система ОДУ для этих тестов имеет вид:

$$\begin{aligned} kr &= ku/ki, kc = kt \cdot ki/ku, kl = kt \cdot ku/ki; \\ dx_1/dt &= x_4/0,001kc; \\ dx_2/dt &= x_5/0,001kc; \\ dx_3/dt &= (x_4 - x_5)/kc; \\ dx_4/dt &= (ku - x_1 - x_3 - kr \cdot x_4)/1001kl; \\ dx_5/dt &= (-x_2 + x_3 - kr \cdot x_5)/999kl; \\ x_1(0) &= 0; x_2(0) = 0; x_3(0) = 0; \\ x_4(0) &= 0; x_5(0) = 0; \\ t &\in (0, 12560kt). \end{aligned}$$

Сравнение программ было приведено для часто встречающихся на практике параметров масштабных коэффициентов по времени, току и напряжению:  $kt = 1, ki = 1, ku = 10^{-2}$ , а также для значений пара-

Сравнение решателей ОДУ—ДАУ для жестких систем ОДУ

Тесты\Решатели ОДУ	SADEL C-Library 2010 Методы M2, M3	MATLAB 2007 Метод Ode15s	Maple 2007 Метод Rosenbrock	NAG C-Library 2012 Метод BDF	Mathematica 8 2011 Метод BDF	IMSL C-Library 2012 Метод BDF
ТЕСТ 1. Уравнения Ван дер Поля $MU = 10^6$	+	+	-	+	-	+
ТЕСТ 2. Уравнения Ван дер Поля $MU = 10^9$	+	-	-	-	-	-
ТЕСТ 3. Высокодобротный фильтр $kt = 1, ki = 1, ku = 0,01$	+	-	+	-	+	-
ТЕСТ 4. Высокодобротный фильтр $kt = 10^{-104}, ku = 1, ki = 1$	+	-	-	-	+	-
ТЕСТ 5. Локально неустойчивая система ОДУ $MU = 10^6$	+	-	-	-	+	-
ТЕСТ 6. Моделирование свечения лазера	+	+	-	+	+	-

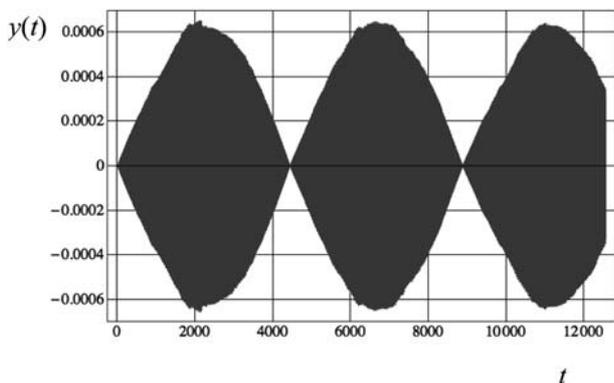


Рис. 3. Решение ТЕСТ 4, полученное с помощью библиотеки C-Library NAG при TOL = 0,001

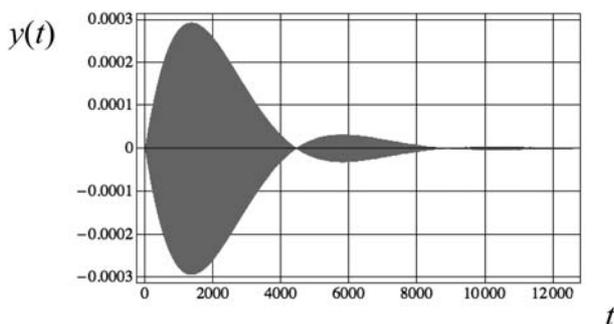


Рис. 4. Правильное решение ТЕСТ 4

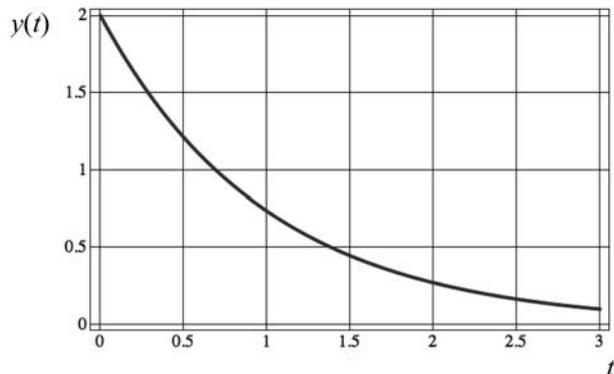


Рис. 5. Решение ТЕСТ 5, полученное с помощью библиотеки C-Library NAG при TOL = 0,001

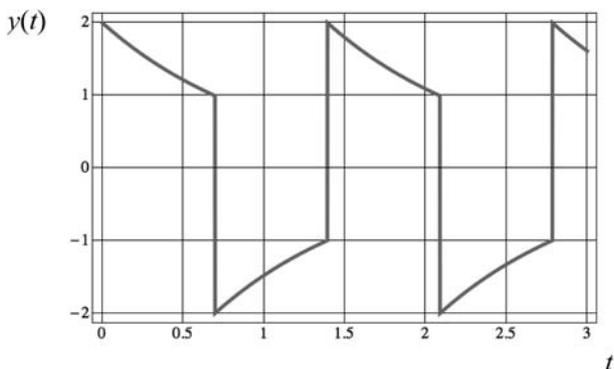


Рис. 6. Правильное решение ТЕСТ 5

метров  $kt = 10^{-104}$ ,  $ki = 1$ ,  $ku = 1$ , которые дают трудный тест для современных решателей систем ОДУ.

**ТЕСТ 5.** Нелинейная жесткая система ОДУ, имеющая локально-неустойчивое решение — тест Скворцова [12]. Система ОДУ для этого теста имеет вид:

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= x_2; \\ dx_2/dt &= MU(1 - x_1^2)(x_1 + x_2); \\ x_1(0) &= 2; x_2(0) = 0, t \in (0, 3). \end{aligned}$$

Сравнение программ было проведено для часто встречающегося на практике значения жесткости  $MU = 10^6$ .

**ТЕСТ 6.** Нелинейная жесткая система ОДУ для математического моделирования процессов реального лазера — тест Евстифеева [13]. Система ОДУ для этого теста имеет вид:

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= -x_1(\alpha x_2 + \beta) + \gamma; \\ dx_2/dt &= x_2(px_1 - \sigma) + \tau(1 + x_1); \\ x_1(0) &= -1; x_2(0) = 0, t \in (0, 10^6); \\ \alpha &= 1,5 \cdot 10^{-18}, \beta = 2,5 \cdot 10^{-6}, \gamma = 2,1 \cdot 10^{-6}; \\ p &= 0,6, \sigma = 0,18, \tau = 0,016. \end{aligned}$$

Сравнение решателей ОДУ было проведено для параметров реального работающего лазера.

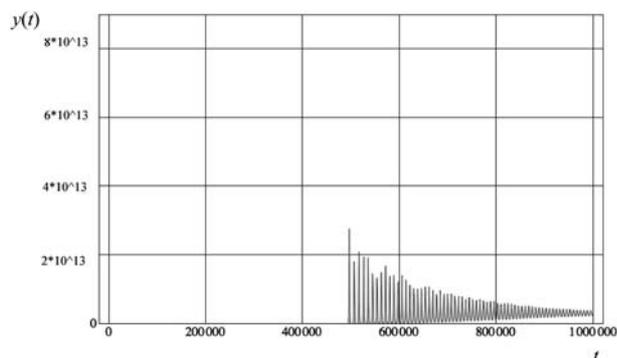


Рис. 7. Решение ТЕСТ 6, полученное с помощью библиотеки C-Library IMSL при TOL = 0,001

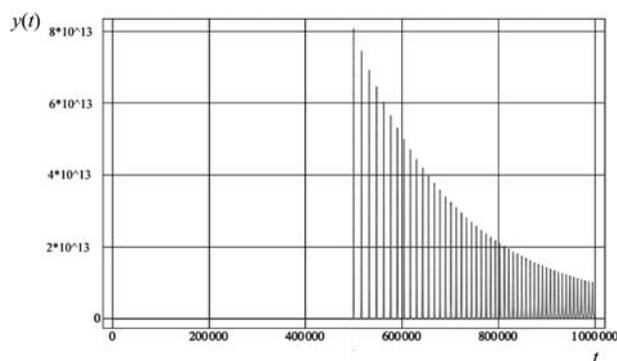


Рис. 8. Правильное решение ТЕСТ 6

На рис. 3—8 представлены результаты решения некоторых тестов с помощью решателя ОДУ—ДАУ методом BDF библиотек C-Library NAG и C-Library IMSL, а также правильное решение этих тестов. Предупреждений о возможном недостоверном решении в решателях библиотек C-Library NAG и C-Library IMSL не было.

### Заключение

Разработка программ-решателей систем ОДУ—ДАУ и ЛАУ на языке Си для библиотеки SADEL позволяет сделать следующие выводы.

При реализации вычислительных методов решения жестких систем ОДУ и плохо обусловленных систем ЛАУ не следует использовать вычисления с одинарной точностью (*single precision*).

При решении систем НАУ на каждом шаге численного неявного интегрирования следует использовать только итерационные методы, которые в точке решения сводятся к решению систем ЛАУ с матрицей Якоби в качестве матрицы коэффициентов системы ЛАУ (в SADEL реализован метод Ньютона).

Системы ЛАУ на каждом шаге численного интегрирования в точке решения систем НАУ следует решать с компьютерной удвоенной точностью (*double precision*) с использованием методов "сверхточных" вычислений.

При программной реализации формул неявного интегрирования систем ОДУ—ДАУ не должно быть арифметических операций деления на шаг интегрирования, чтобы не было ограничений на значение этого шага "снизу" [11].

Если программа-решатель систем ОДУ—ДАУ не решит достоверно и точно, хотя бы одну из приведенных в статье тестовых задач, то этот решатель не следует использовать для моделирования динамических систем, математическая модель которых представляет собой жесткую систему ОДУ—ДАУ.

Новые научные результаты предполагается получить в направлениях развития новых методов и алгоритмов решения систем ДАУ и ЛАУ сверхбольшой размерности с выполнением расчетов на универсальном и на персональном суперкомпью-

терах. В первую очередь следует разработать методы "сверхточного" решения систем ЛАУ высокой размерности.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-07-00324/12.*

### Список литературы

1. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic 754-2008, IEEE, 2008 // URL: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5223319&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5223319](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5223319&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5223319).
2. Андронов А. В., Жук Д. М., Кожевников Д. Ю., Маничев В. Б. Библиотека математических программ-решателей на языке Си: SADEL. URL: // <http://pa10.ru>.
3. Жук Д. М., Маничев В. Б., Андронов А. В. Платформа математического моделирования во временной области разнородных технических систем и объектов FMS PA10 // Сб. научных трудов МЭС — 2010. М.: Изд. ИППМ РАН, 2010.
4. Вержбицкий В. М. Основы численных методов: учебник для вузов. М.: Высш. школа, 2002. 840 с.
5. Жук Д. М., Маничев В. Б., Ильницкий А. О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области. В 2-х частях // Информационные технологии. 2010. № 7. (Часть 1). № 8. (Часть 2).
6. Жук Д. М., Маничев В. Б. Программа DMAN для решения дифференциально-алгебраических уравнений. Номер гос. регистрации 2009612666 от 27 мая 2009.
7. Маничев В. Б., Глазкова В. Н., Кожевников Д. Ю., Кирьянов Д. А., Сахаров М. К. Решение систем линейных алгебраических уравнений с удвоенной точностью вычислений на языке Си // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2011. Вып. 4. С. 25—35.
8. Норенков И. П., Трудоношин В. А., Федорук В. Г. Метод формирования математических моделей для адаптируемых программных комплексов анализа радиоэлектронных схем // Радиотехника. 1986. № 9. С. 67—72.
9. Маничев В. Б., Глазкова В. Н. Методы интегрирования систем ОДУ для адаптируемых программных комплексов анализа РЭС // Радиотехника. 1988. № 4. С. 88—91.
10. Тыртышников Е. Е. Методы численного анализа: учеб. пособие для студ. вузов. М.: Академия, 2007. 320 с. (Университетский учебник. Сер. Прикладная математика и информатика).
11. Маничев В. Б. Новые алгоритмы для программ анализа динамики технических систем // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 1996. Вып. 1. С. 48—56.
12. Скворцов Л. М. Явный многошаговый метод численного решения жестких дифференциальных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47, № 6. С. 959—967.
13. Системы автоматизированного проектирования: учеб. пособие для вузов в 9 кн., кн. 8 // Под ред. И. П. Норенкова. М.: Высшая школа, 1986.
14. Guiyou Mao, Petzold L. R. Efficient integration over discontinuities for differential-algebraic systems // Computers & Mathematics with Applications. January 2002. Vol. 43. Is. 1—2. P. 65—79.

**Ю. Н. Артеменко**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, зав. отделом,  
e-mail: altishenko@jahoo.com,

**С. В. Волкоморов**<sup>2</sup>, аспирант,  
e-mail: lester1986@gmail.com,

**А. П. Карпенко**<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
e-mail: apkarpenko@mail.ru,

**В. А. Мартынюк**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: mart@rk6.bmstu.ru,

**В. Н. Пашенко**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц., зав. каф.,  
e-mail: pashenkovn@inbox.ru,

**К. А. Темерев**<sup>3</sup>, студент,  
e-mail: kirill.temerev@gmail.com,

**А. В. Шарыгин**<sup>3</sup>, студент,  
e-mail: tratil@list.ru

<sup>1</sup> Астрокосмический центр ФИАН  
им. П. Н. Лебедева

<sup>2</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана

<sup>3</sup> Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Многосекционный манипулятор параллельной структуры для управления ориентацией космической обсерватории "Миллиметр"

*Рассматривается один из вариантов космической обсерватории «Миллиметр», в котором для ориентации антенны используется многосекционный манипулятор параллельной структуры. Приведены некоторые результаты исследования этого манипулятора, выполненные с помощью САД-систем SolidWorks и NX, а также с помощью программной системы MATLAB Simulink. Для планирования траектории перемещения антенны используется оригинальное программное обеспечение.*

**Ключевые слова:** космическая обсерватория "Миллиметр", параллельный механизм, многосекционный манипулятор типа хобот

### Введение

Федеральной космической программой России предусматривается создание космической обсерватории "Миллиметр" (проект "Спектр-М") с раскрываемой адаптивной антенной диаметром 10 м, работающей в диапазоне длин волн от 20 мкм до 20 мм. Планируется, что антенна обсерватории будет работать при температуре ~4,5 К, что обеспечит ее сверхвысокую чувствительность, позволяющую получить информацию от сверхслабых источников, предельно удаленных и недоступных для наблюдений современными наземными и космиче-

скими средствами. Научные задачи проекта требуют, чтобы точность наведения антенны в инерциальном пространстве была не хуже 1", а ее стабилизирующие колебания не превышали 0,2" [1].

Для охлаждения антенны до указанной температуры необходимо защитить ее от солнечных лучей с помощью системы теплозащитных радиационных экранов и одного активного криоконтейнера. В статье рассматривается конструкция, в которой продольная ось космического аппарата (КА) постоянно ориентирована на Солнце, так что антенна обсерватории всегда находится в тени радиационных экранов. Назовем такую конструкцию *Зонт-П*. Для обеспечения наведения антенны на исследуемый источник космического излучения в этом случае необходимо поворачивать саму антенну. Это обстоятельство кардинально отличает Зонт-П-обсерваторию от других космических обсерваторий, где антенны или оптические зеркала жестко закреплены на служебном модуле КА и поворачиваются вместе с ними средствами ориентации КА.

Можно предложить несколько устройств для управления ориентацией антенны в Зонт-П-обсерватории. Одно из таких устройств представлено на рис. 1 (см. четвертую сторону обложки), где непосредственно под антенной изображен криоконтейнер с приемной аппаратурой. Систему теплозащитных экранов образует 10 пассивных цилиндрических зонтиков и один аналогичный активный зонт. В нижней части КА находится так называемый теплый контейнер с научной аппаратурой, а также служебный модуль с солнечными батареями.

Общая длина представленного варианта обсерватории составляет 22...24 м, общая масса — чуть менее 7 т, причем около 2,5 т приходится на долю теплового контейнера и служебного модуля, на котором находятся реактивные двигатели коррекции, ориентации и стабилизации, а также двигатели-маховики. Масса антенны с криоконтейнером также составляет примерно 2,5 т. Между указанными частями обсерватории располагаются трансформируемые конструкции раскрываемых радиационных экранов и одного активного криоконтейнера, в также поворотное устройство общей длиной около 12 м и массой около 1,5 т. Таким образом, КА приобретает гантелеобразную форму.

В статье рассматривается альтернативное поворотное устройство антенны в виде многосекционного манипулятора параллельной структуры типа хобот [2].

Предварительный анализ показывает, что поворот антенны на 1" требует перемещения элементов поворотного устройства на 0,3 мкм (при перемещениях до 50...75 мкм). Для обеспечения такой точности в состав поворотного устройства дополнительно вводится прецизионный гексапод [2] на

пъездвигателях, который позволяет обеспечить точность перемещений не хуже 0,1 мкм. Этот же гексапод является исполнительным устройством системы гашения высокочастотных колебаний антенны до уровня менее 0,2". Данный гексапод в статье не рассматривается.

В первом разделе приведена постановка задачи.

Проектирование поворотного устройства антенны в виде рассматриваемого манипулятора требует решения целого комплекса сложных и плохоформализованных задач. Для решения этих задач целесообразна разработка специализированной программной системы автоматизированного проектирования. Во втором разделе представлен прототип ее основной подсистемы — подсистемы автоматизированного структурного синтеза. Разработанное программное приложение формирует проектное решение в виде параметризованной компоновочной 3D-модели манипулятора в CAD-системе *SolidWorks*, а также в программном пакете *MATLAB Simulink*. С помощью указанного приложения выполнено исследование моделей нескольких манипуляторов.

В целях проверки адекватности указанной *SolidWorks*-модели геометрическая 3D-модель манипулятора построена также средствами "тяжелой" графической системы *NX* и ее приложения "Симуляция кинематических механизмов" (раздел 3). С помощью данной модели подтверждена адекватность *SolidWorks*-модели манипулятора.

Самостоятельной сложной задачей является планирование траектории перевода антенны из текущего в заданное допустимое положение. Для решения этой задачи разработано программное приложение, обеспечивающее решение прямой и обратной задач позиционирования многосекционного манипулятора. С помощью этого приложения построены траектории перемещения антенны, которые оставляют неподвижным центр масс системы антенна — криоконтейнер (раздел 4).

Проектирование рассматриваемого манипулятора требует также решения комплекса задач по разработке системы автоматического управления (САУ) таким манипулятором. Первая из задач, которые нужно решить, состоит в выборе и обосновании парадигмы (классические САУ, адаптивные САУ, нейросетевые САУ и т. д.), в рамках которой следует строить такую систему. Для исследования возможности использования классических САУ средствами системы *MATLAB Simulink* построена модель пятисекционного управляемого манипулятора (раздел 5). С помощью данной модели выполнено исследование кинематики и динамики переходных процессов в манипуляторе при переводе его из исходного в рабочее положение, а также АЧХ и ФЧХ системы управления манипулятором.

В заключении сформулированы основные результаты работы и перспективы ее развития.

## 1. Постановка задачи

Заданы следующие основные массогабаритные характеристики системы антенна обсерватории — криоконтейнер:

- диаметр антенны — 10 000 мм;
- суммарная масса антенны и криоконтейнера — 2500 кг;
- центр масс системы антенна — криоконтейнер находится на оси симметрии антенны на расстоянии 3200 мм от основания криоконтейнера.

Диаметр обтекателя ракеты-носителя накладывает ограничение на максимально допустимый диаметр секций манипулятора, равный 3640 мм. Высота манипулятора в его сложенном (транспортном) состоянии не должна превышать 750 мм.

В качестве секций манипулятора используем механизмы параллельной кинематики типа гексапод (платформа Стюарта) [2], общее число которых из соображений надежности и простоты управления не должно превышать пяти.

Полагаем, что для минимизации массы манипулятора платформы гексаподов изготавливаются в виде равносторонних треугольников со срезанными вершинами из углепластика трубчатого прямоугольного сечения 40 × 100 мм, имеющего плотность 1550 кг/м<sup>3</sup>. Штанги гексаподов могут быть двух- и трехсоставными и изготавливаются также из указанного углепластика.

Манипулятор должен обеспечивать ориентацию антенны обсерватории в пределах полусферы, ось симметрии которой совпадает с продольной осью симметрии КА. Во всех случаях антенна должна отстоять от основания первой платформы манипулятора не менее чем на 500 мм.

Центр масс системы антенна—криоконтейнер для простоты записи называем далее схватом манипулятора. Угол между осью симметрии антенны и продольной осью симметрии КА обозначаем  $\alpha$ , а его максимально достижимое значение —  $\alpha_{\max}$ .

## 2. Синтез манипулятора средствами *SolidWorks*

В силу значительной кинематической сложности даже односекционных параллельных механизмов для 3D-моделирования, анализа и синтеза многосекционного манипулятора возможно использование только CAD-систем среднего класса типа *Inventor*, *SolidWorks*, *SolidEdge*, КОМПАС и "тяжелых" систем типа *CATIA*, *UNIGRAPHICS*, *Pro-Engineer*. В данном разделе рассматриваем использование системы *SolidWorks*.

Для построения средствами системы *SolidWorks* 3D-модели многосекционного манипулятора в среде *Microsoft Visual Studio 2010* разработано программное приложение. Приложение является одним из модулей разрабатываемой авторами системы поддержки принятия решений (СППР), предназ-

наченной для проектирования многосекционных манипуляторов параллельной структуры. Приложение реализует следующие основные функции:

- принимает параметры манипулятора, передаваемые в виде текстового файла;
- выводит на экран древовидную структуру манипулятора с указанием всех его параметров;
- позволяет пользователю изменить значения этих параметров;
- осуществляет построение параметрической 3D-модели манипулятора средствами системы *SolidWorks API* [3].

Основной частью приложения является объектная модель манипулятора. Каждому конструктивному элементу манипулятора (штанга, шарнир и др.) поставлен в соответствие программный объект, описывающий основные его свойства. Таким образом, модель манипулятора представляет собой иерархию объектов типа секция, штанга, шарнир, платформа.

С помощью данного приложения разработаны четыре параметризованных модели манипулятора:

- манипулятор 1а — все платформы одинаковы, штанги двухсоставные;
- манипулятор 1б — все платформы одинаковы, штанги трехсоставные;
- манипулятор 2а — промежуточные платформы имеют меньшие размеры, штанги двухсоставные;
- манипулятор 2б — промежуточные платформы имеют меньшие размеры, штанги трехсоставные.

Во всех случаях длины штанг определены из условия возможности складывания манипулятора в транспортное положение. Поскольку речь идет о геометрическом моделировании, указанные модели не включают в себя модели приводов штанг.

**SolidWorks-модель манипулятора 1.** Модель пятисекционного манипулятора 1а в положении  $\alpha = \alpha_{\max}$  иллюстрирует рис. 2. Пятисекционный манипулятор, построенный из секций одинакового размера с использованием двухсоставных штанг, не позволяет перевести антенну обсерватории в положение  $\alpha > 52^\circ$ .

Модель манипулятора 1б в его предельном положении представлена на рис. 3. Данный манипулятор позволяет обеспечить требуемую ориентацию антенны обсерватории.

**SolidWorks-модель манипулятора 2.** С помощью данной модели выполнен синтез пятисекционного манипулятора при следующих соглашениях:

- размеры первой и последней платформ манипулятора совпадают с размерами платформ манипулятора 1;
- размеры промежуточных платформ одинаковы.

Ставилась задача найти максимально возможный диаметр промежуточных платформ, обеспечивающий выполнение условия  $\alpha_{\max} = 90^\circ$ . Методом перебора диаметров промежуточных платформ ус-

тановлено, что пятисекционный манипулятор 2а способен решить поставленную задачу при диаметрах, равных 1721 мм (рис. 4).

Поскольку конструктивно более простой манипулятор 2а решает поставленную задачу, манипулятор 2б не рассматриваем.

В разделе 4 показано, что данный манипулятор позволяет выполнить требуемую ориентацию антенны таким образом, чтобы сохранить положение центра масс системы антенна — криоконтейнер на оси симметрии КА.

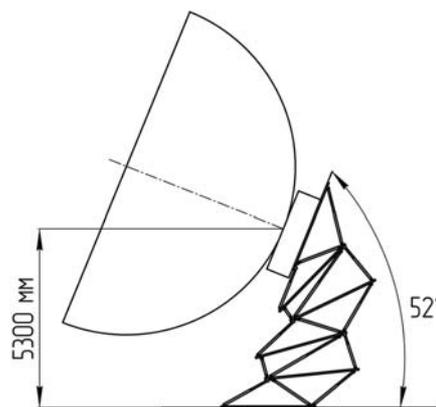


Рис. 2. *SolidWorks*-модель манипулятора 1а:  $\alpha = \alpha_{\max} = 52^\circ$

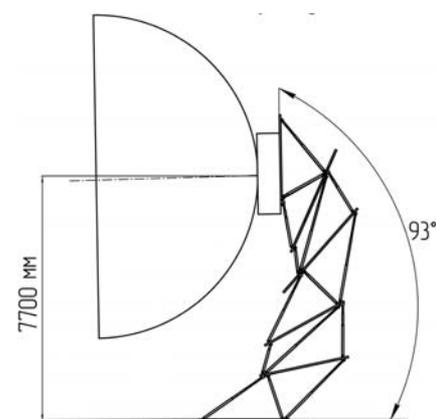


Рис. 3. *SolidWorks*-модель манипулятора 1б:  $\alpha = \alpha_{\max} = 93^\circ$

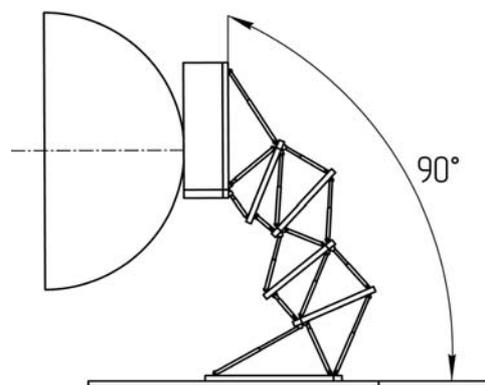


Рис. 4. *SolidWorks*-модель манипулятора 2а:  $\alpha = \alpha_{\max} = 90^\circ$

### 3. Синтез манипулятора средствами системы NX

Основной целью данного раздела является проверка адекватности моделей манипулятора, рассмотренных в разделе 2, путем построения аналогичных 3D-моделей средствами "тяжелой" графической системы NX 7.5 и ее приложения "Симуляция кинематических механизмов" [4].

**NX-модель секции манипулятора 1a.** Эта модель представлена на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки). Каждая из телескопических штанг секции состоит из стакана и подвижного штока. Полагаем, что шток может быть выдвинут из стакана не более чем на 2/3 от своей длины, так что минимальная и максимальная длины штанги равны 1300 и 2000 мм соответственно.

Каждая из штанг крепится к нижней платформе (основанию) с помощью шарнира Гука, а к верхней платформе — с помощью сферического шарнира. Схему соединения платформ иллюстрирует рис. 6 (см. четвертую сторону обложки), на котором число точек в углу платформы равно номеру этого угла (что необходимо для однозначной идентификации штанг секции).

Рис. 7 (см. четвертую сторону обложки) иллюстрирует предельное положение манипулятора 1a, в котором ось симметрии антенны перпендикулярна оси симметрии КА. Обратим внимание на разрывы штанг во всех секциях, кроме верхней. Эти разрывы свидетельствуют о том, что обеспечить требуемый поворот антенны с помощью манипулятора 1a не удастся. В то же время из рисунка следует, что недостаток длин штанг невелик и может быть покрыт трехсоставными штангами.

**Расстояние между платформами в функции длины штанг.** С помощью NX-модели манипулятора 1a выполнено исследование зависимости расстояния

между платформами  $H$  секции манипулятора от длины штанг  $L$  (табл. 1). Принято, что длины  $L$  всех шести штанг меняются одновременно и синхронно.

Табл. 1 показывает, что для того чтобы поднять платформу из транспортного положения на 100 мм, длины штанг нужно не увеличивать, а наоборот, уменьшать (хотя всего примерно на 3 мм). Таким образом, при проектировании одноразового устройства, которое должно обеспечивать перевод манипулятора из транспортного в исходное положение (когда начинают нормально функционировать двигатели его приводов), следует учитывать данное обстоятельство. Отметим также, что, как следует из той же таблицы, для увеличения расстояния между платформами со 100 до 300 мм, штанги нужно удлинить всего на 15 мм.

### 4. Синтез траектории перевода манипулятора в заданное положение

Для синтеза траектории перевода манипулятора из заданного в требуемое конечное положение разработано C++ программное приложение. При разработке использованы кроссплатформенные библиотеки Qt (интерфейс диалогового окна программы) и OpenGL (визуализация манипулятора). Приложение написано в соответствии с идеями объектно-ориентированного программирования и состоит из набора классов, иерархически связанных между собой. Приложение обеспечивает решение прямой и обратной задач кинематики манипулятора.

**Прямая позиционная задача (ППЗ).** Задача состоит в определении положения и, быть может, ориентации схвата манипулятора при заданных значениях длин всех его штанг.

Свяжем с  $i$ -й секцией манипулятора систему координат  $0_i x_i y_i z_i$ , в которой ось  $0_i y_i$  совпадает с продольной осью симметрии этой секции, а оси  $0_i x_i$ ,  $0_i z_i$  расположены таким образом, что образуют с осью  $0_i y_i$  правую тройку (рис. 8). Полагаем, что с основанием манипулятора связана система координат  $0_0 x_0 y_0 z_0$ .

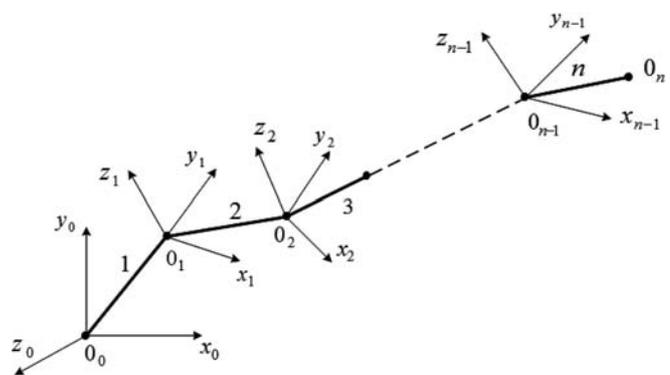


Рис. 8. Системы координат манипулятора: 1, 2, ..., n — номера секций;  $0_n$  — схват манипулятора

Таблица 1

Расстояние между платформами  $H$  в функции длины штанг  $L$

Длина тяг $L$ , мм	Расстояние $H$ , мм	Длина тяг $L$ , мм	Расстояние $H$ , мм
1467,86	0	1479,05	300
1467,20	10	1486,81	350
1466,70	20	1496,20	400
1465,47	50	1507,19	450
1465,00	70	1519,74	500
1464,79	100	1533,82	550
1464,86	110	1549,39	600
1465,00	120	1566,40	650
1465,20	130	1580,89	700
1465,47	140	1625,60	800
1465,81	150	1714,60	900
1466,70	170	1834,80	1200
1468,54	200	1961,00	1400
1472,96	250	2100,00	1600

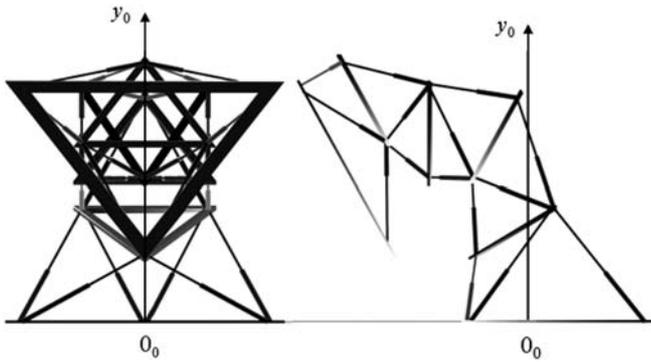


Рис. 9. К решению прямой позиционной задачи: произвольное положение манипулятора 2а в двух проекциях

Введем следующие обозначения:  $T_i, i \in [1:(n-1)]$  — однородная  $(4 \times 4)$ -матрица, задающая переход от системы координат  $0_i x_i y_i z_i$  к системе координат  $0_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ ;  $q_i$  — вектор обобщенных координат  $i$ -й секции манипулятора (в нашем случае — шестимерный вектор длин штанг гексапода, на основе которого построена данная секция);  $q = (q_1, q_2, \dots, q_{n-1})^T$  — вектор обобщенных координат манипулятора;  $T_n = T_1 T_2, \dots, T_{n-1}$  — однородная  $(4 \times 4)$ -матрица, определяющая положение системы координат  $0_n - 1x_n - 1y_n - 1z_n - 1$  в системе координат  $0_0 x_0 y_0 z_0$ ;  $s$  — обобщенный  $(4 \times 1)$ -вектор положения схвата манипулятора  $0_n$  в системе координат  $0_n - 1x_n - 1y_n - 1z_n - 1$ ;  $S$  — аналогичный  $(4 \times 1)$ -вектор положения схвата  $0_n$  в системе координат  $0_0 x_0 y_0 z_0$  [5].

Во введенных обозначениях имеем выражение

$$S = T_n(q)s = F(q), q \in Q, \quad (1)$$

где  $Q$  — совокупность допустимых значений вектора обобщенных координат  $q$ , формируемых конструктивными и функциональными ограничениями на компоненты этого вектора.

Таким образом, для решения ППЗ достаточно вычислить элементы матрицы  $T_n(q)$  и ее произведение на вектор  $s$ . Пример результатов решения ППЗ для манипулятора 2а с помощью разработанного приложения приведен на рис. 9

**Обратная позиционная задача (ОПЗ).** Задача состоит в определении длин штанг всех секций манипулятора, обеспечивающих заданное положение и, быть может, ориентацию схвата манипулятора. В общем виде ОПЗ формулируем следующим образом: при заданном векторе  $S$  найти допустимые обобщенные координаты манипулятора  $q \in Q$ , удовлетворяющие уравнению (1).

Относительно компонентов вектора  $q$  уравнение (1) представляет собой систему шести нелинейных тригонометрических уравнений с  $6(n-1)$  неизвестными. Эта система может не иметь ни одного решения (требуемое положение схвата недостижимо), иметь одно решение или бесконечно

много решений (требуемое положение схвата может обеспечить бесконечное число конфигураций манипулятора). Для многосекционного манипулятора последний случай является типичным, что позволяет ставить задачу поиска в каком-то смысле оптимального решения ОПЗ.

В рассматриваемом приложении для решения задачи (1) использован итерационный и оптимизационный методы. Итерационный метод, в отличие от оптимизационного, позволяет получить не только искомое конечное положение манипулятора, но и набор его промежуточных положений, соответствующих переводу манипулятора из начального положения в искомое [6]. Вместе с тем, оптимизационный метод при необходимости позволяет достаточно легко учитывать дополнительные требования, предъявляемые к искомой конфигурации манипулятора (путем интеграции их в критерий оптимальности конфигурации). Далее рассматриваем только итерационный метод.

Суть итерационного метода решения ОПЗ поясним на простейшем примере двухзвенного манипулятора (рис. 10), где требуемое положение схвата  $O_2$  обозначено крестиком.

Поворот на малый угол манипулятора вокруг шарнира  $O_0$  приводит к смещению схвата в направлении вектора  $a$ , а такой же поворот вокруг шарнира  $O_1$  — к смещению схвата в направлении вектора  $b$ . Для приведения манипулятора в искомое положение нужно, очевидно, сместить схват  $O_2$  в направлении вектора  $t$ . При этом вращение вокруг шарнира  $O_1$  приведет лишь к ухудшению ситуации, а вокруг шарнира  $O_0$ , напротив, может уменьшить расстояние от схвата  $O_2$  до цели.

Основная идея итерационного метода решения ОПЗ состоит в том, что приращения обобщенным координатам в каждом из сочленений манипулятора следует давать на величину, пропорциональную тому, насколько это приращение приближает схват

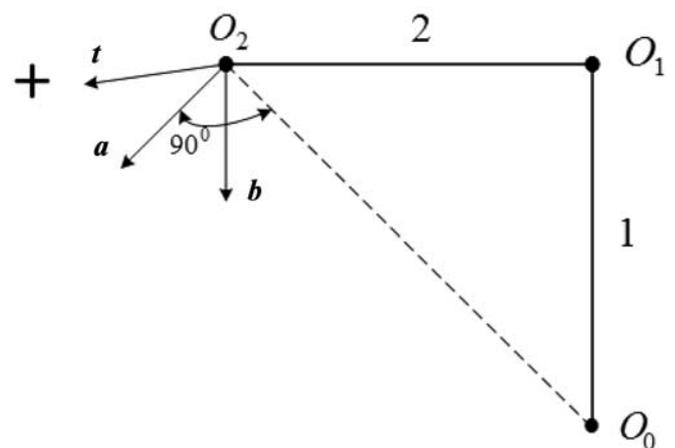


Рис. 10. К схеме итерационного метода решения обратной позиционной задачи: плоский двухзвенный манипулятор

манипулятора к цели. В качестве указанной величины метод использует скалярное произведение: для первого звена —  $(t, a)$ , для второго звена —  $(t, b)$ .

**Позиционирование манипулятора.** При решении задачи позиционирования манипулятора приложение позволяет использовать два режима. В первом режиме переход в требуемое положение начинается непосредственно из текущего положения, а во втором осуществляется предварительное выведение манипулятора в положение, в котором ось симметрии антенны совпадает с продольной осью симметрии КА ( $\alpha = 0$ ). Данный режим позиционирования иллюстрирует рис. 11, на котором точкой отмечено положение схвата манипулятора.

Приложение обеспечивает решение задачи позиционирования манипулятора также при условии, что схват манипулятора неподвижен, а направление  $0_{n-1}, 0_n$  требуемым образом ориентировано относительно продольной оси симметрии КА. Эта возможность приложения позволяет решать задачу ориентации антенны при неподвижном схвате (если это допускает конструкция манипулятора). С точки зрения управления КА такой режим ориентации является предпочтительным, поскольку позволяет разгружать двигатели — маховики КА. Указанную возможность приложения также иллюстрирует рис. 12.

### 5. Исследование кинематики и динамики манипулятора средствами системы MATLAB Simulink

Рассматриваем пятисекционный манипулятор 2а, платформы которого имеют различные размеры, а штанги являются двухсоставными (см. раздел 2). Принимаем следующие значения параметров гексаподов:

- диаметры окружностей, на которых лежат точки крепления штанг к основанию нижней секции манипулятора и к пятой платформе,  $D = 2803$  мм;
- аналогичные диаметры для точек крепления штанг к первым четырем платформам  $D_{пл} = 1701$  мм;
- толщина платформ,  $h_{пл} = 40$  мм;

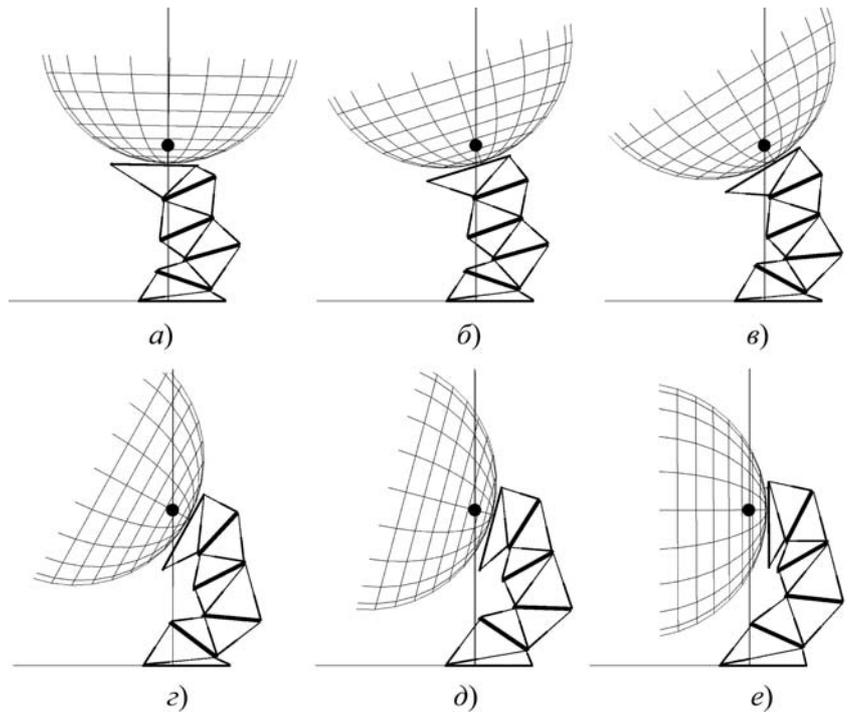


Рис. 11. Раскадровка второго режима позиционирования схвата манипулятора 2а

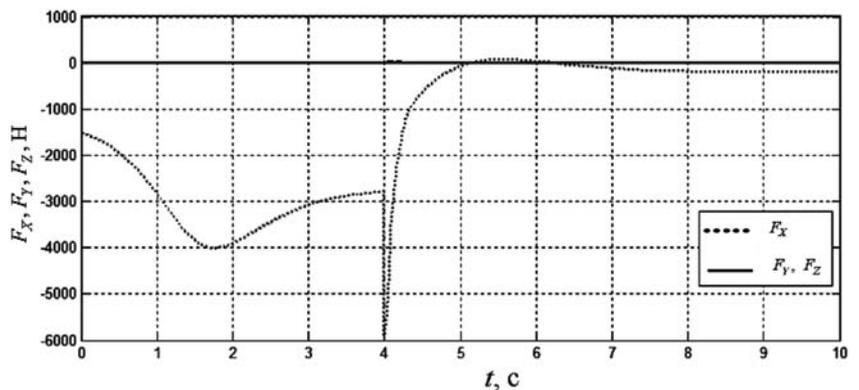


Рис. 12. Компоненты усилий в приводах манипулятора в функции времени: первая секция

- нижняя полуштанга каждой из секций имеет внешний диаметр 80 мм, внутренний диаметр — 60 мм;
- верхняя полуштанга каждой из секций имеет внешний диаметр 60 мм, внутренний диаметр — 40 мм.

Массы платформ берем из расчета, что они изготовлены из указанного в разделе 1 трубчатого углепластика, так что массы первых четырех платформ равны 44,3 кг, а масса последней пятой платформы равна 60,3 кг. Массу каждой из штанг принимаем равной 39,3 кг, причем полагаем, что 2/3 этой массы сосредоточены в середине штанги (тем самым учитываем массу электропривода штанги).

В качестве САУ длинами штанг манипулятора рассматриваем двухконтурную систему с двумя ти-

пами регуляторов — пропорциональные регуляторы и ПИД регуляторы [8].

**Simulink-модель управляемого манипулятора.**

Эта модель является иерархической и включает в себя подмодели следующих уровней [9]:

- структурный уровень манипулятора, задающий взаимосвязи моделей секций манипулятора;
- уровень секции манипулятора (модель одной секции);
- уровень штанги манипулятора (модель штанги, включая модель ее САУ);
- уровень САУ штангой манипулятора.

В модели секции манипулятора принято, что платформа является абсолютно жестким телом, у которого имеется масса и моменты инерции. Модель штанги включает в себя модели упругости штанги и сил трения в шарнирах, а также модели указанных двухконтурных САУ. Представленная модель не содержит модели динамики приводов штанги, хотя от этих приводов в значительной степени зависит динамика всего механизма. Поэтому полученные с помощью данной модели результаты носят предварительный характер. В случае задания конструкции приводов модель может быть достаточно просто расширена путем включения в нее моделей этих приводов.

**Переходные процессы в системе.**

Рассматриваем два предельных положения манипулятора:

- исходное положение, когда платформы с помощью одноразового устройства переведены в состояние, при котором начинают нормально функционировать двигатели приводов гексаподов (см. раздел 3);
- одно из рабочих положений, при котором центры масс всех платформ расположены в одной плоскости и плоскость последней пятой платформы перпендикулярна основанию, так что  $\alpha = \alpha_{\max} = 90^\circ$ .

С помощью рассмотренной Simulink-модели манипулятора выполнено исследование переходных процессов при переводе манипулятора из исходного в указанное рабочее положение. Принято, что

центры масс всех платформ совершают плоское движение. В момент времени  $t = 4$  с на САУ каждой из штанг манипулятора подаем ступенчатый сигнал. Поскольку рассматриваем плоское движение манипулятора, длины каждой из пар штанг (1, 6), (2, 5), (3, 4) изменяются по одному и тому же закону. Начальные и конечные длины штанг всех секций манипулятора приведены в табл. 2.

Выполнено широкое исследование кинематики и динамики манипулятора при различных значениях параметров регуляторов. В качестве примера на рис. 12 в функции времени представлены компоненты усилий, возникающих в приводах первой из платформ. Результаты соответствуют использованию САУ с ПИД регуляторами, параметры которых имеют следующие значения:  $P_1 = 1,5; I_1 = 1,0; D_1 = 0; P_2 = 5,0; I_2 = 2,0; D_2 = 0$ . Здесь  $P_i, I_i, D_i, i = 1, 2$ , — пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи соответственно. Данные значения параметров получены нами в предыдущих исследованиях как оптимальные.

С помощью представленной Simulink-модели манипулятора выполнено также исследование АЧХ и ФЧХ управляемого манипулятора.

**Заключение**

Можно выделить следующие достоинства варианта Зонт-П-обсерватории "Миллиметр":

- наведение антенны происходит на любой пространственный угол в полусфере, ограниченной экранами радиационного охлаждения и активного криоконтейнера;
- имеется возможность обеспечить сохранение неизменным (или близким к неизменному) положение центра масс КА в процессе наведения антенны;
- антенна приобретает свойства шарового маятника в гантелеобразной конструкции КА, а ее наведение происходит по углам Эйлера;
- процесс переориентации антенны можно использовать для разгрузки двигателей-маховиков КА;
- имеется возможность сохранить живучесть устройства поворота антенны при выходе из строя одного или нескольких приводов штанг гексаподов (с частичной потерей функциональности, конечно).

В работе решены следующие основные задачи.

1. С помощью программного приложения, осуществляющего автоматизированное построение средствами SolidWorks 3D-модели манипулятора, показано, что:

- пятисекционный манипулятор 1а, имеющий одинаковые платформы и двухсоставные штанги, не позволяет выполнить все необходимые ориентации антенны обсерватории;
- аналогичный манипулятор с трехсоставными штангами позволяет решить эту задачу;

Таблица 2

**Длины штанг манипулятора**

Номер секции	Начальное положение $L_1 = L_2 = \dots L_6$ , мм	Конечное положение $L_1; L_2; L_3; L_4; L_5; L_6$ , мм
Секция 1	1153,62	1167,87; 1901,78; 1901,78; 1167,87; 1937,28; 1937,28
Секция 2	816,45	1289,14; 929,68; 929,68; 1289,14; 1188,70; 1188,70
Секция 3	816,45	796,28; 1258,10; 1258,10; 796,28; 1331,01; 1331,01
Секция 4	816,45	1333,35; 832,48; 832,48; 1333,35; 1134,07; 1134,07
Секция 5	1153,62	1149,58; 1244,58; 1244,58; 1149,58; 1707,30; 1707,30

- с помощью пятисекционного манипулятора 2а, имеющего промежуточные платформы меньшего диаметра и двухсоставные штанги, возможно достижение всех необходимых ориентаций антенны обсерватории.

2. Средствами "тяжелой" графической системы NX7.5 и ее приложения "Симуляция кинематических механизмов" построена геометрическая 3D-модель манипулятора 1а. С использованием этой модели подтверждена достоверность приведенных выше результатов. С помощью этой же модели исследована зависимость высоты подъема секции манипулятора от длин ее штанг. Подтверждено, что для перевода манипулятора из транспортного в рабочее положение необходимы дополнительные механизмы.

3. Разработано программное приложение, позволяющее решать прямую и обратную позиционные задачи для многосекционного манипулятора. Приложение поддерживает решение обратной задачи при условии обеспечения неподвижности центра масс системы антенна — криоконтейнер (когда меняется только ориентация оси симметрии антенны). С помощью разработанного приложения показано, что для манипулятора 2а имеется возможность спланировать перемещение антенны, оставляющее неподвижным центр масс указанной системы. Для синтеза алгоритмов изменения длин штанг, обеспечивающих указанное перемещение, требуются дополнительные исследования.

4. Разработана *Simulink*-модель пятисекционного манипулятора 2а, длины штанг которого управляются с помощью пропорциональных и классических ПИД регуляторов. Выполнено исследование кинематики и динамики переходных процессов в управляемом манипуляторе при переводе его из исходного в одно из рабочих положений. Разработанная модель позволяет решать задачу выбора оптимальных значений параметров САУ приводами манипулятора. Модель может быть легко модифицирована для исследования эффективности более развитых САУ.

Развитие работы требует решения следующих задач:

- расчет конструкции манипулятора на жесткость;
- определение частот собственных колебаний конструкции;
- вычисление моментов инерции, которые должны парировать двигатели-маховики КА при переориентации антенны обсерватории;
- синтез оптимальных траекторий перевода антенны из заданного в требуемое положение с учетом возможных отказов приводов одной или нескольких штанг;
- синтез адаптивных классических и нейросетевых систем управления манипулятором, обеспечивающих переориентацию антенны в условиях указанных выше отказов.

Результаты работы позволяют сделать вывод о принципиальной возможности создания многосекционного манипулятора, являющегося по своей сути трансформируемым многофункциональным космическим роботом-манипулятором, для обеспечения навигационных задач орбитальной астрофизической обсерватории "Миллиметр".

#### Список литературы

1. **Артеменко Ю. Н., Карпенко А. П., Темерев К. А., Шарыгин А. В.** Структурно-параметрический синтез многосекционного робота-манипулятора параллельной структуры // Матер. 4-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Т. 2. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С. 167—170.
2. **Волкоморов С. В., Карпенко А. П.** Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа хобот // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 23—27.
3. **Основные** элементы *Solidworks* (*Solidworks* 2010). М.: Dassault, 2009. 550 с.
4. **Краснов М., Чигишев Ю.** Unigraphics для профессионалов. М.: Лори, 2004. 141 с.
5. **Зенкевич С. Л., Ющенко А. С.** Основы управления манипуляционными роботами. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
6. **Hugo Elias.** Inverse Kinematics Improved Methods. URL: [http://freespace.virgin.net/hugo.elias/models/m\\_ik2.htm](http://freespace.virgin.net/hugo.elias/models/m_ik2.htm)
7. **Глазунов В. А., Колискор А. Ш., Крайнев А. Ф.** Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 94 с.
8. **Буянкин В. М., Гоменок С. М., Карпенко А. П., Литун Т. О.** Нейросетевая идентификация и управление некоторыми механизмами параллельной кинематики // Информационные технологии. Приложение. 2011. № 11. 32 с.
9. **Черных И. В.** Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>

**И. П. Норенков**, д-р техн. наук, проф.,  
e-mail: norenkov@rk6.bmstu.ru,  
**М. Ю. Уваров**, инженер,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Семантический анализ текстовых документов\*

*Семантический анализ текстов сводится к решению задач классификации и аннотирования документов. Для повышения эффективности методов семантического анализа предлагается выполнять классификацию и аннотирование документов на основе результатов ролевой и тематической кластеризации онтологий.*

**Ключевые слова:** семантический анализ, классификация, аннотирование, онтология, ролевая кластеризация онтологий

### Введение

В современных корпоративных информационных системах накоплен большой объем неструктурированной или слабо структурированной информации в виде документов, представляющих собой научно-технические статьи, технические описания промышленной продукции, другие фрагменты проектной текстовой документации. Для использования этой информации в интеллектуальных процессах принятия управленческих и/или проектных решений необходимо располагать методами семантического анализа документов.

Основная цель семантического анализа — извлечение знаний из документов и их предоставление пользователю в удобной для использования форме, чаще всего в сжатом виде, например, в виде аннотации содержания или списка некоторых других характеристик документов, являющихся их метаданными. Метаданные подразделяются на атрибутивные и семантические. При семантическом анализе определяются семантические метаданные документа, их совокупность будем называть семантическим образом документа (СОД). Типичными слотами СОД являются ключевые слова, наименование рубрики, тема, аннотация (реферат). Формализованное представление семантики множества документов, объединенных в некоторую рубрику, будем называть семантическим образом рубрики (СОР).

Естественной основой семантического анализа является использование онтологий. При этом в автоматически получаемое множество ключевых слов

входят имеющиеся в тексте термины, соответствующие наиболее важным концептам онтологии и приведенные к канонической форме. Важность концепта обычно определяется по показателю  $TF*IDF$  [1].

Рубрикой (тематическим кластером) является множество документов, содержание которых соответствует заданному приложению. Распределение документов по рубрикам осуществляется при решении задачи классификации. Обзор методов классификации документов имеется в ряде источников, например [2, 3]. Для задач классификации обычно требуется предварительное определение числа и наименований рубрик, их перечень получается путем обработки обучающей выборки, состоящей из документов, специально отобранных пользователями-экспертами. При онтологическом подходе роль обучающей выборки выполняют имеющиеся частные (задачные) онтологии [4, 5], каждая из них соответствует одной из рубрик.

Точность классификации зависит от ряда факторов, в число которых входят размеры и характер тестовой коллекции документов, наличие или отсутствие априорно заданного перечня рубрик и др. Согласно данным, полученным в результате многих экспериментов с большими коллекциями документов при использовании разных типов документов и рубрикаторов и приведенным в [6—8], лучшие оценки  $F$ -меры, отражающей как полноту, так и точность классификации, составляют 45—55 %.

В рамках каждой рубрики возможно выделение ряда более частных тем. Частные темы могут быть включены в число ключевых слов документа или упомянуты в отдельном слоте метаданных. Определение тематики документа выполняется одновременно с его аннотированием.

Основными методами автоматического аннотирования и реферирования документов в настоящее время являются экстрактивные (извлекающие) методы. В аннотацию включаются предложения со словами или словосочетаниями, имеющими вес выше некоторого порогового значения. Вес определяется частотой повторения слова, его местом в документе (например, в заголовках и подзаголовках), вес предложения зависит также от наличия в нем некоторых сопровождающих слов типа "в итоге", "в заключение" и т. п. В работе [9] предлагается вариант экстрактивного метода, при котором аннотация составляется из предложений, включающих не менее двух концептов (тематических узлов), выделяемых по показателю частотности. Аннотирование с применением онтологий позволяет составлять аннотацию из терминов концептов или значений (экземпляров) концептов, найденных в тексте документа [2, 10—12].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-07-00222а).

Разновидностями извлекающего аннотирования являются разработка аннотации по запросу и сводное реферирование. При наличии запроса аннотация составляется из частей документа, в которых имеется концентрация терминов запроса [13]. Получаемый результат может использоваться в качестве сниппета в ответе поисковой системы. Сводное реферирование (аннотирование группы документов) [14–16] — более сложная задача, так как требуется в сжатой форме охарактеризовать содержание коллекции или потока документов, например, текстов докладов или тезисов докладов некоторой конференции. Методы сводного реферирования также основаны на отборе предложений с наибольшим весом, определяемым как сумма частот содержащихся в них значимых слов или словосочетаний.

К результатам аннотирования предъявляются противоречивые требования связности и информативности, трудности их одновременного удовлетворения в большинстве подходов обуславливают применение финальной ручной корректировки.

Таким образом, несмотря на большое число работ, посвященных семантическому анализу текстов, проблема повышения полноты и точности решения задач информационного поиска и классификации, связности и информативности автоматического аннотирования остается актуальной. Одним из направлений повышения эффективности решения задач семантического анализа применительно к неструктурированным документам научно-технического характера является применение кластеризованных онтологий, другими словами, использование в качестве концептов словосочетаний со специальным образом подобранными ролями входящих в них слов [5].

Статья посвящена изложению основных положений метода семантического анализа документов, основанного на ролевой и тематической кластеризации онтологий, и его использования для формирования семантических образов рубрик и документов.

### Кластеризация онтологий

Основу предлагаемого метода семантического анализа составляет использование словосочетаний, называемых паттернами, в которых составляющие

их слова выполняют определенные семантические роли. К числу основных ролей относятся: А) объект; В) свойство; С) действие; D) средство. Структурой паттерна является последовательность слотов, соответствующих каждому определенной роли. Значениями слотов являются концепты используемой онтологии. Концепты в зависимости от роли, которую они выполняют в возможных словосочетаниях, предварительно распределяются по кластерам, т. е. каждый концепт может быть включен в один или несколько кластеров. Примерами паттернов структуры ВА может служить "емкость памяти", СА — "моделирование электронной схемы", DCA — "алгоритм синтеза расписания" и т. п. В метаданных документов именно такие паттерны используются для обозначения рубрик, тематики и, как будет показано далее, составляют основу аннотаций в СОД.

Кроме ролевой, в методе кластеризации онтологий (МКО) применяют тематическую кластеризацию онтологий. При этом используются понятия общей и частных онтологий. Общая онтология соответствует некоторому научно-техническому направлению, например, совокупности родственных научно-технических дисциплин, а частные онтологии — отдельным дисциплинам или разделам дисциплин. Тематическая кластеризация выполняется преимущественно для концептов ролевого кластера "объект", поскольку большинство концептов других ролевых кластеров инвариантно к приложениям.

### Семантические образы рубрик

Формирование семантических образов рубрик поясняет рисунок. В большинстве известных методов классификации семантическими образами рубрик являются двоичные или частотные векторы, характеризующие наличие или отсутствие в документах слов из используемого словаря. Обучающие выборки, представляющие рубрики, или формируются экспертом вручную из документов заданной коллекции, или создаются с помощью методов кластеризации, основанных на определении расстояний между подобными векторами. Элементы каждого вектора исходного СОР соответствуют словам словаря и равны частотам  $tf$  (term frequencies) употребления слов в документах. Результирующий СОР обра-

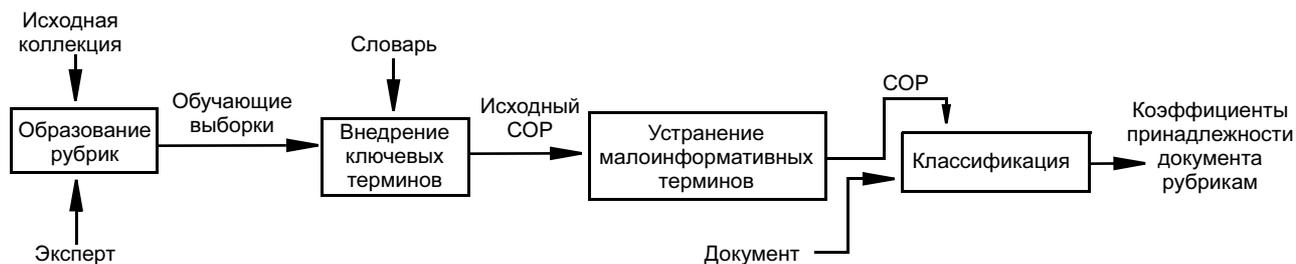


Таблица 1

зуется из исходного после удаления элементов малоинформативных терминов, определяемых по значениям показателя  $idf$  (inverse document frequency).

Особенности семантического анализа на основе кластеризованных онтологий заключаются, во-первых, в автоматическом формировании обучающих выборок, во-вторых, в использовании общей онтологии в качестве словаря и частных онтологий вместо векторов документов в качестве  $SOP$ . Создание  $SOP$  для очередного приложения (рубрики) состоит из следующих шагов:

- создание обучающей выборки с помощью информационного поиска документов в исходной коллекции, релевантных запросу, составленному из одного или нескольких терминов, характерных для рассматриваемого приложения;
- формирование исходного  $SOP$  в виде пересечения множеств концептов общей онтологии и терминов из документов обучающей выборки;
- образование результирующего  $SOP$  путем удаления малоинформативных терминов из исходного  $SOP$ .

Преимущества использования онтологий в качестве  $SOP$  заключаются в легкости сопровождения  $SOP$ , в частности, его адаптации к изменяющимся условиям рубрикации документов.

В качестве примеров применения предлагаемого подхода рассмотрим:

- формирование  $SOP$  для нескольких приложений ("Нейронные сети", "Генетические алгоритмы" и "Защита информации") на основе заданной общей онтологии, посвященной информационным технологиям;
- использование  $SOP$  для выполнения классификации (рубрикации) множества документов.

Первый шаг создания  $SOP$  заключался в поиске документов по запросам "нейронные сети, нейрокомпьютер", "генетический алгоритм, генетический метод", "защита информации, информационная безопасность". Второй шаг — поиск в найденных документах терминов, соответствующих концептам общей онтологии. Третий шаг — составление частной онтологии из информативной части полученных концептов.

В табл. 1 приведена часть результатов формирования  $SOP$  в виде перечней терминов, вошедших в результирующие  $SOP$  рассматриваемых приложений, и их коэффициентов информативности  $w_{ij}$ . Информативность  $i$ -го термина применительно к  $j$ -му приложению характеризуется отношением

$$w_{ij} = h_{ij}/H_i,$$

где  $h_{ij} = r_{ij}/N_j$ ,  $H_i = R_i/N$ ;  $r_{ij}$  — число документов, отнесенных к  $j$ -му приложению и включающих  $i$ -й концепт;  $R_i$  — число документов в коллекции, включающих  $i$ -й концепт;  $N_j$  — число документов, отнесенных к  $j$ -му приложению;  $N$  — число документов

Термин	Информативность термина $w_{ij}$		
	Нейронные сети	Генетические алгоритмы	Защита информации
Сигнал	<b>2,05</b>	0,27	0,58
Экспертная система	<b>2,21</b>	1,06	0,99
Имитационная модель	<b>2,22</b>	1,87	0,58
Интеллектуальная система	<b>2,29</b>	1,28	1,20
Распознавание	<b>2,36</b>	0,48	1,10
Обратная связь	<b>2,41</b>	0	0,87
Искусственный интеллект	<b>2,72</b>	0,40	0,45
Диагностика	<b>2,77</b>	0,76	0,72
Лингвистическая переменная	<b>2,80</b>	1,18	<b>2,20</b>
Вейвлет	<b>4,58</b>	0	0,90
Сеть Кохонена	<b>5,25</b>	1,77	0
Мягкие вычисления	<b>5,40</b>	<b>3,03</b>	<b>2,83</b>
Обратное распространение	<b>5,67</b>	0	0,99
Нейрон	<b>6,15</b>	1,03	0,72
Многослойная сеть	<b>6,30</b>	0	0
Нейрокомпьютер	<b>6,30</b>	1,33	0
Нейронная сеть	<b>6,30</b>	1,94	0,56
Сеть Хопфилда	<b>6,30</b>	0	0
Реляционная модель	1,89	<b>2,12</b>	0
Нечеткая логика	<b>2,42</b>	<b>2,45</b>	<b>2,28</b>
Кластеризация	<b>2,41</b>	<b>3,12</b>	0,29
Поколение	1,86	<b>3,37</b>	0
Целевая функция	1,18	<b>4,14</b>	0,46
Фаззификация	<b>4,73</b>	<b>5,30</b>	0
Расписание	0,97	<b>5,30</b>	0,38
Ген	<b>2,80</b>	<b>8,83</b>	0
Хромосома	<b>2,75</b>	<b>9,94</b>	0
Популяция	<b>3,50</b>	<b>10,6</b>	0
Кроссинговер; скрещивание	<b>4,85</b>	<b>10,6</b>	0
Селекция	<b>3,94</b>	<b>10,6</b>	1,24
Мутация	<b>3,94</b>	<b>10,6</b>	0
Генетический алгоритм	<b>2,00</b>	<b>10,6</b>	0
Клиент	0,80	0,23	<b>2,32</b>
Сервер	0,36	0	<b>2,55</b>
Сообщение	0,59	0,28	<b>2,64</b>
Криптография	0,70	0	<b>3,30</b>
Вычислительная сеть	0,63	0,35	<b>3,96</b>
Аутентификация	1,11	0	<b>6,41</b>
Вторжение	<b>2,10</b>	0	<b>6,60</b>
Атака	0,60	0,50	<b>9,43</b>
Вирус	0	0	<b>9,90</b>
Межсетевой экран	0	0	<b>9,90</b>
Политика безопасности	0	0	<b>9,90</b>
Защита информации	0,73	0	<b>9,90</b>

Таблица 2

Рубрика	$P_k$	$T_k$	$F_k$
Сети	0,79	0,55	0,65
Программирование	0,59	0,64	0,61
Компьютеры	0,57	0,50	0,53
Генетические алгоритмы	1,00	0,64	0,78
Интеллектуальные системы	0,43	0,79	0,56
Безопасность информации	0,80	0,89	0,84
Оптимизация	0,37	0,58	0,45
Моделирование	0,89	0,67	0,76
Базы данных	0,83	0,48	0,61
Компьютерная графика	0,73	0,65	0,69

в коллекции. В автоматически сформированных результирующих СОР фигурируют термины, имеющие коэффициенты информативности не менее 2.

Сформированные перечни концептов частных онтологий используются для рубрикации документов. Результаты рубрикации 300 документов (научно-технические статьи из журнала "Информационные технологии") по 10 рубрикам приведены в табл. 2, где  $P_k = |\mathbf{D}_k|/|\mathbf{B}_k|$  — коэффициент полноты,  $T_k = |\mathbf{D}_k|/|\mathbf{C}_k|$  — коэффициент точности рубрикации,  $F_k = 2/(1/P_k + 1/T_k)$ . Здесь  $\mathbf{B}_k$  — множество документов, отнесенных экспертом к  $k$ -й рубрике,  $\mathbf{C}_k$  — множество документов, для которых автоматически найденной системой коэффициент  $m_{ik}$  принадлежности  $i$ -го документа к  $k$ -й рубрике не меньше коэффициентов его принадлежности к ос-

тальным рубрикам;  $\mathbf{D}_k = \mathbf{B}_k \cap \mathbf{C}_k$ , где  $\cap$  — знак пересечения множеств. Релевантными считались документы, одинаково отрубрицированные экспертом и системой (примерно в 20 % документов эксперт указывал для документа не одну, а две, по его мнению, равноценных рубрики, при этом документ считался успешно найденным системой, т. е. включался в множество  $\mathbf{D}_k$ , если рубрика с максимальным значением  $m_{ik}$  совпадала хотя бы с одной из двух оценок эксперта).

Данные табл. 2 свидетельствуют о приемлемости полученных результатов классификации.

### Семантические образы документов

Как указано выше, перечень затронутых в документе тем и его аннотация определяются в процессе аннотирования. В предлагаемом методе задача аннотирования решается на основе ролевой кластеризации онтологий и поиска в документе словосочетаний заданных структур. Слот "Тема" в СОД заполняется словосочетаниями, частота повторения которых в документе не ниже заданного порога. Аннотация, входящая в одноименный слот, составляется из предложений, включающих найденные словосочетания. Если объем аннотации превышает заданную величину, то предпочтение на включение в аннотацию имеют предложения, находящиеся в начале документа.

В табл. 3 представлены примеры автоматически полученных аннотаций научно-технических статей. Использовались паттерны структур СА, СВА, DCA, DA, в таблице они выделены полужирным курсивом.

Таблица 3

№	Наименование документа и автоматически составленная аннотация
1	<p><b>Алгоритмические, архитектурные и структурные методы организации управляющих процессов в виртуальном пространстве средств Grid-системы</b></p> <p>Grid-система выполняет специфические функции обслуживания, такие как прием и первичная <i>обработка запросов</i>, выбор и применение <i>методов обслуживания, назначение и управление</i> ресурсами, сбор и возвращение результатов пользователю. Отображена схема формирования и <i>обработки пакетов</i> задач пользователя. <i>Задачи каждого пакета</i> с помощью диспетчера должны распределяться между ресурсными процессорами назначенного кластера. Диспетчер Хост-процессора реализует оптимальный план <i>решения каждого пакета</i> задач поступающего потока. Критерием оптимизации является минимум времени <i>решения пакета</i> задач. <i>Задачи пакета</i> накапливаются в буфере Хост-процессора и располагаются в очереди в порядке невозрастания времени решения. Упорядочение <i>задач пакета</i> по невозрастанию времени решения может быть предусмотрено при <i>формировании этих пакетов</i> управляющей системой.</p>
2	<p><b>Транзитивно-фаззи системы и транзитивно-фаззи принцип оптимизации нечетких информационных систем</b></p> <p>Известны многие универсальные принципы оптимизации и <i>синтеза информационных систем</i>, которые с успехом используются при решении различных <i>задач управления</i>. Излагаемый ниже транзитивно-фаззи принцип оптимизации концептуально отображает единство детерминированных и фаззи систем, открывает новые возможности в создании единых методов анализа и <i>синтеза информационных систем</i>, рассматриваемых в качестве транзитивно-дефинитных фаззи систем (далее, для краткости называемых транзитивно-фаззи системами). Очевидно, что если транзитивная функция однозначна и монотонна, то можно ожидать однозначную <i>трансформацию функции принадлежности</i>. Существующая потенциальная возможность <i>трансформации функции принадлежности</i> в транзитивно-фаззи системах дает основу для формирования следующих оптимизационных <i>задач проектирования</i> и синтеза таких систем, которые, в свою очередь, составляют основу транзитивно-фаззи принципа <i>оптимизации информационных систем</i>.</p>

№	Наименование документа и автоматически составленная аннотация
3	<p style="text-align: center;"><b>Применение аппарата генетических алгоритмов для моделирования и формирования расписания операций в многопрофильной клинике</b></p> <p>Рассматриваются вопросы <i>применения аппарата генетических алгоритмов</i>, являющегося одной из парадигм эволюционных вычислений, для моделирования и <i>формирования расписания</i> операций в многопрофильной хирургической клинике в целях повышения эффективности лечебного и организационного процессов. Для решения поставленной задачи было решено <i>использовать генетические алгоритмы</i>, поскольку последние получают внушительное преимущество перед другими способами при решении задач поиска оптимальных решений. <i>Задача составления расписания</i> операций сводится к задаче выбора такого варианта вектора OPER из числа возможных, который с учетом ограничений и критериев будет в максимальной степени способствовать достижению поставленной цели. В каждом демосе произвести оператор отбора, для того чтобы выбрать пару особей для последующего <i>применения оператора скрещивания</i> или мутации. <i>Применение оператора скрещивания</i> или оператора мутации для пар родителей, выбранных оператором отбора, в каждом демосе. В качестве инструментального <i>средства при создании автоматизированной системы</i> (АС) для составления расписания операций в МК использовалась система программирования Microsoft Visual C++ 6.0 Enterprise Edition, поскольку она позволяет создавать компактные и эффективные приложения для операционных систем Microsoft Windows. <i>Методы и алгоритмы, которые АС</i> использует для составления расписания, описаны ранее. Интерфейс пользователя АС интуитивно прост и понятен как для работы, так и для обучения, соответствует принятым стандартам <i>разработки программного обеспечения</i> для операционных систем семейства Microsoft Windows. Сохранение расписания в виде гипертекста позволяет просматривать, редактировать и печатать его не только <i>средствами данной АС</i>, но и средствами других программных приложений и утилит. <i>Формирование расписания</i> операций и вывод на экран в табличной форме. По результатам опытной эксплуатации АС можно сделать предварительное заключение о том, что <i>автоматизация составления расписания</i> операций в многопрофильной клинике посредством <i>применения аппарата генетических алгоритмов</i> и <i>средств информационных технологий</i> позволяет поднять на качественно иной уровень работу многопрофильной клиники, во-первых, повышая эффективность принятия решений руководством клиники, а, во-вторых, модифицируя организационный и лечебный процессы.</p>

В большинстве случаев для улучшения связности требуется стилистическая коррекция аннотации. Некоторые виды корректировок могут проводиться автоматически. Например, желательно удалять слова типа "поэтому", нецелесообразно включать в аннотацию предложения, содержащие формулы, ссылки на формулы и рисунки, слова "такой", "подобный", "этот" и некоторые другие фразы.

### Заключение

Изложены методы формирования семантических образов отдельных документов и множеств документов. Семантические образы являются главным результатом решения задач аннотирования и рубрикации документов. Методы основаны на ролевой и тематической кластеризации онтологий и направлены на извлечение знаний из документов в целях семантического анализа текстов и поддержки принятия решений.

### Список литературы

1. Salton G., Buckley C. Term weighting approaches in automatic text retrieval // Information Processing and Management. 1988. V. 24, N 5. P. 513—523.
2. Ageev M. S., Dobrov B. V., Lukashovich N. V. Автоматическая рубрикация текстов: методы и проблемы // Учен. записки. Казан. гос. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2008. Т. 150. Кн. 4. С. 25—40.
3. Fernández M., Vallet D., Castells P. Automatic Annotation and Semantic Search from Protégé // In: 8th International Protege Conference. 2005. Madrid, Spain.
4. Nagarajan M., Sheth A., Aguilera M., Keeton K., Merchant A., Uysal M. Altering Document Term Vectors for Classification — Ontologies as Expectations of Co-occurrence // 16th World Wide Web Conference. 2007. P. 1225—1226.

5. Норенков И. П., Уваров М. Ю. Задачи обработки знаний на основе ролевой кластеризации онтологий // Информационные технологии. 2012. № 2. С. 19—24.

6. Лукашевич Н. В. Методы автоматической рубрикации и оценка их качества. URL: [http:// like-money.ru/stati/259-metody-avtomaticheskoy-rubrikaczii-i-ocenka-ix-kachestva](http://like-money.ru/stati/259-metody-avtomaticheskoy-rubrikaczii-i-ocenka-ix-kachestva)

7. Максаков А. Сравнительный анализ алгоритмов классификации и способов представления Web-документов // Тр. Третьего российского семинара по оценке методов информационного поиска. СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ. 2005. С. 63—73.

8. Goadrich M., Oliphant L., Shavlik J. Gleaner: Creating Ensembles of First-Order Clauses to Improve Recall-Precision Curves. URL: <http://ftp.cs.wisc.edu/machine-learning/shavlik-group/goadrich.mlj06.pdf>

9. Лукашевич Н. В. Автоматическое аннотирование новостных кластеров на основе тематического представления // Матер. Международной конф. "Диалог 2009". URL: <http://www.dialog-21.ru/dialog2009/materials/html/46.htm>

10. Ермаков Л. М. Методы классификации текстов и определения качества контента // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2011. Вып. 3 (7). С. 47—53.

11. Handschuhl S., Staabl S., Ciravegna F. S-CREAM — Semi-automatic CREAtion of Metadata // In Proc. of the European Conference on Knowledge Acquisition and Management EKAW-2002. Madrid: Springer, 2002.

12. Kiryakov A., Popov B., Terziev I., Manov D., Ognyanoff D. Semantic Annotation, Indexing, and Retrieval // Journal of Web Semantics. 2005. Issue 1. P. 47—49.

13. Бродский А. Алгоритмы контекстно-зависимого аннотирования Яндекса / А. Бродский, Р. Ковалев, М. Лебедев, Д. Лещинер, П. Сушин // Труды РОМИП, 2008. С. 160—169.

14. Башмаков А. И., Башмаков И. А. Интеллектуальные информационные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 304 с.

15. Тарасов С. Д. Алгоритм ранжирования связанных структур для задачи автоматического составления обзорных рефератов новостных сюжетов // Тр. 11-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2008). Дубна. Россия. Т. 2. С. 204—211.

16. Абрамов Н. Н., Абрамова В. Е. Автоматическое составление обзорных рефератов новостных сюжетов // Интернет-математика 2007. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2007. С. 5—15.

**А. Н. Божко**, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: abozhko1@gmail.com,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

## Моделирование позиционных связей в механических системах

*Обсуждается новый подход к описанию механических связей, доставляющих элементам машины или прибора определенность положения в составе технической системы. Бинарные механические и многоместные геометрические связи представляются в виде гиперсети. Эта содержательная структурная модель дает основания для постановки и решения множества важных проблем конструирования и технологического проектирования. В частности, показано, что сборка изделия может быть описана в виде последовательности нормальных стягиваний гиперсети. Предлагается модель разбиения изделия на сборочные единицы. Она сформулирована в терминах дискретного математического программирования. Ее универсальная система ограничений построена на основе гиперсетевой модели и хорошо сочетается с различными критериями оптимизации. Рассмотрен один важный частный случай, когда критерием декомпозиции служит минимальное число сопрягаемых поверхностей.*

**Ключевые слова:** сборка, механическая связь, сопряжение, гиперсеть, базирование, граф, гиперграф, стягивание, узел, сборочная единица, схема сборочного состава

Одним из важнейших этапов жизненного цикла изделий является разработка сборочных процессов. Трудно назвать примеры технических систем, производство которых происходит без применения механосборочных операций. Сборка — это процесс политехнический, поэтому на качество проектных решений влияет множество факторов различной физической природы. Из этого многообразия технических, экономических, технологических и других условий и ограничений выделим механические связи, которые закладываются в конструкцию на этапе проектирования. Эти связи (соединения и сопряжения), наложенные на элементы технической системы, образуют механическую структуру машины или прибора. Именно механическая структура обеспечивает (или не обеспечивает) необходимые условия для выбора рациональной последовательности сборки и предоставляет основания для разбиения изделия на сборочные единицы в условиях выбранного производства и заданной технологической оснащённости. Любое нарушение целостности структуры делает проект системы полностью неработоспособным, и наоборот, отработанное и принятое к производству проектное решение является реализацией одной из возможных механических структур.

## Формализация условий базирования

В классической механике под механическими связями принято понимать ограничения, которые накладываются на координаты и скорости механической системы. Математическим описанием таких связей служат системы равенств и неравенств, связывающие скорости, пространственные координаты элементов системы и время. В теоретических исследованиях по технологии машиностроения, где акценты смещены с динамических характеристик системы на ее статическое состояние, этому понятию дается более узкое толкование. Под механическими связями понимают совокупность соединений и сопряжений деталей, которые доставляют машине или механическому прибору и функциональную тождественность, и геометрическую целостность.

Ограничимся обсуждением механических систем (машин, приборов, аппаратов, установок и пр.), элементы которых могут рассматриваться как твердые тела. Из теоретической механики известно, что любое свободное твердое тело в пространстве имеет шесть степеней свободы. Оно может перемещаться параллельно трем координатным осям и вращаться вокруг них. Для того чтобы зафиксировать твердое тело в трехмерном универсуме, на него необходимо наложить шесть геометрических связей.

В технологии машиностроения эти связи материализуются с помощью взаимных контактов деталей (чаще всего) и абстрагируются в виде так называемых опорных точек. Для размещения опорных точек требуется выбрать три поверхности детали или заменяющие их совокупности конструктивных элементов (пересечение поверхностей, оси или плоскости симметрии, технологическую разметку и пр.). Поверхность или иной конструктивный элемент, используемый для размещения опорных точек в процессе базирования, называется базой. В технологических исследованиях предложена подробная классификация баз, охватывающая многочисленные проектные и производственные ситуации, которые возникают на различных этапах жизненного цикла изделия. В данной работе будем рассматривать только базы, используемые для координатации деталей и сборочных единиц в составе изделия. Такие базы называются конструкторскими. Главной и высшей таксономией конструкторских баз является их разделение на основные и вспомогательные. Напомним, что основные базы принадлежат элементу механической системы (детали или сборочной единице) и служат для определения его положения в составе изделия. Вспомогательные — это базы, предназначенные для определения положения присоединяемых элементов (деталей и сборочных единиц).

Конструкторские базы представляют собой конструктивно реализованные координатные системы, предназначенные для ориентации и координации деталей в процессе сборки изделия. С точки зрения взаимной скоординированности составляющих элементов изделие можно рассматривать как совокупность деталей, связанных отношением базирования. Отношение базирования влияет на важнейшие конструктивные и технологические свойства изделий. Например, от него зависят допустимые варианты декомпозиции на сборочные единицы, возможные последовательности общей и узловой сборки, варианты разборки машины или ее отдельных узлов в процессе ремонта и др.

В многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов базирование рассматривалось как бинарное отношение, а для его математического описания использовался аппарат теории графов, математической логики и алгебры [3–5, 7]. Такая формализация, достаточная для решения некоторых важных задач структурного анализа и синтеза изделий, не является исчерпывающей, поскольку не позволяет выделить многоместные группировки деталей, являющихся носителями полных комплектов конструкторских баз. В данной работе предлагается новый способ описания условий базирования, которое рассматривается как отношение переменной местности, заданное на множестве деталей изделия.

Представим механическую структуру технической системы в виде гиперсети. В отличие от графов аппарат гиперсетей не получил широкого распространения в инженерных исследованиях, поэтому приведем основные определения, описывающие данную структурную модель [6].

Гиперсетью называется вектор вида

$$S = (X, V, R, P, F, W),$$

где  $X = (x_1, \dots, x_n)$  — множество вершин;

$V = (v_1, \dots, v_q)$  — множество ветвей;

$R = (r_1, \dots, r_m)$  — множество ребер;

$P$  — отображения вида  $P: V \rightarrow 2^X$ , ставящее в соответствие каждому элементу  $v \in V$  множество его вершин  $P(v) \subseteq X$ . Тем самым  $P$  определяет гиперграф  $PS = (X, V, P)$  на множестве вершин  $X$ ;

$F$  — отображение вида  $F: R \rightarrow 2^V_{PS}$ , сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  множество  $F(r) \subseteq V$  ветвей, причем семейство подмножеств  $2^V_{PS}$  содержит только связные части гиперграфа  $PS$ . Отображение  $F$  определяет гиперграф  $FS = (V, R, F)$ ;

$W$  — отображение вида  $\forall r \in R W: R \rightarrow 2^{P(F(r))}$ , сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  подмножество  $W(r) \subseteq P(F(r)) \subseteq X$  его вершин, где  $P(F(r))$  — множество вершин в  $PS$ , инцидентных ветвям

$F(r) \subseteq V$ . Тем самым отображение  $W$  определяет гиперграф  $WS = (X, R, W)$ . Гиперграф  $PS$  называется первичной сетью гиперсети  $S$ , а гиперграф  $WS$  — ее вторичной сетью.

На рис. 1 показан пример простой гиперсети седьмого порядка, представляющий все особенности данного класса объектов, существенные для изложения заявленной темы. Первичную сеть  $PS$ , которая является неориентированным графом, образуют все вершины и инцидентные им ребра. Вторичная сеть  $WS$  является гиперграфом на том же носителе, гиперребра  $WS$  изображены на рисунке сплошными замкнутыми кривыми.

Структуру механических связей изделия  $X$  опишем с помощью гиперсети

$$S = (X, V, R, P, F, W), \text{ в которой:}$$

- вершины из  $X = \{x_i\}_{i=1}^N$  представляют детали;
- множество ветвей  $V = \{v_i\}_{i=1}^q$  описывает механические связи (соединения и сопряжения), наложенные на детали;
- ребра  $r \in R, R = \{r_i\}_{i=1}^m$  представляют минимальные геометрические группировки деталей.

Отображение  $P: V \rightarrow 2^X$  сопоставляет каждой ветви пару деталей, между которыми в изделии  $X$  существует механическая связь (соединение или сопряжение),  $|P(v)| = 2$ . Таким образом, первичная сеть  $PS = (X, V, P)$  представляет собой граф механических связей. Вторичная сеть  $WS = (X, R, W)$  гиперсети  $S$  связывает детали изделия таким образом, что отображение  $W$  каждому ребру  $r \in R$  ставит в соответствие минимальное подмножество деталей, геометрическое положение которых полностью определено относительно друг друга. Поскольку такие группировки могут иметь различную мощность, то в общем случае  $|W(r)| \geq 1$ , и вторичная сеть гиперсети  $S$  представляет собой гиперграф. Так как взаимная скоординированность деталей достигается наложением механических связей, то образами геометрически скоординированных множеств являются связные подграфы первичной сети  $PS$ , т. е.

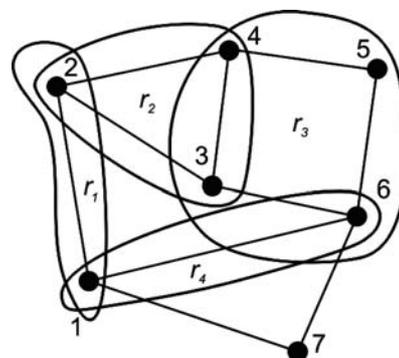


Рис. 1. Пример простой гиперсети

условие связности элементов, составляющих семейство  $2^V_{PS}$ , выполняется.

На рис. 2 приведен чертеж редуктора, а на рис. 3 изображена сопоставленная этому изделию гиперсеть. Напомним, что по правилам построения гиперсети деталям конструкции соответствуют вершины. На приведенных рисунках они обозначены одинаковыми номерами. Первичную сеть  $PS$  образуют все ребра, которые на рис. 3 изображены прямыми линиями. Гиперребра вторичной сети изображены сплошными замкнутыми линиями (например, {11, 16, 21}). Жирными линиями обозначают связи, которые входят как в первичную, так и во вторичную сети. Это дублирование необходимо, поскольку точное изображение всех связей чрезмерно усложнит рисунок и затруднит его восприятие.

Гиперсетевая модель механической структуры изделий оказалась весьма содержательной, поскольку с ее помощью можно решить множество важнейших задач технологической подготовки сборочного производства в машиностроении и приборостроении. Первичная сеть  $PS$  — это хорошо известная модель, находящаяся в научном обращении со времен первых публикаций по автоматизации технологического проектирования [5, 8]. Она применяется на начальных этапах конструкторского и технологического проектирования для структурного анализа, верификации конструкции и обработки изделия на технологичность [5]. Кроме того,  $PS$  помогает построить такой важный источник структурной информации об изделии, каковым является вторичная сеть  $WS$ . Вторичная сеть введена в научный оборот сравнительно недавно [1, 2]. Она представляет собой гиперграф, который лаконично и выразительно описывает принципиальную информацию о позиционных механических связях и взаимной координатности деталей в изделии. Многие свойства конструкции, связанные с ее расчленяемостью и собираемостью в процессе изготовления, получают адекватное выражение в гиперграфовых категориях вторичной сети. Приведем несколько определений.

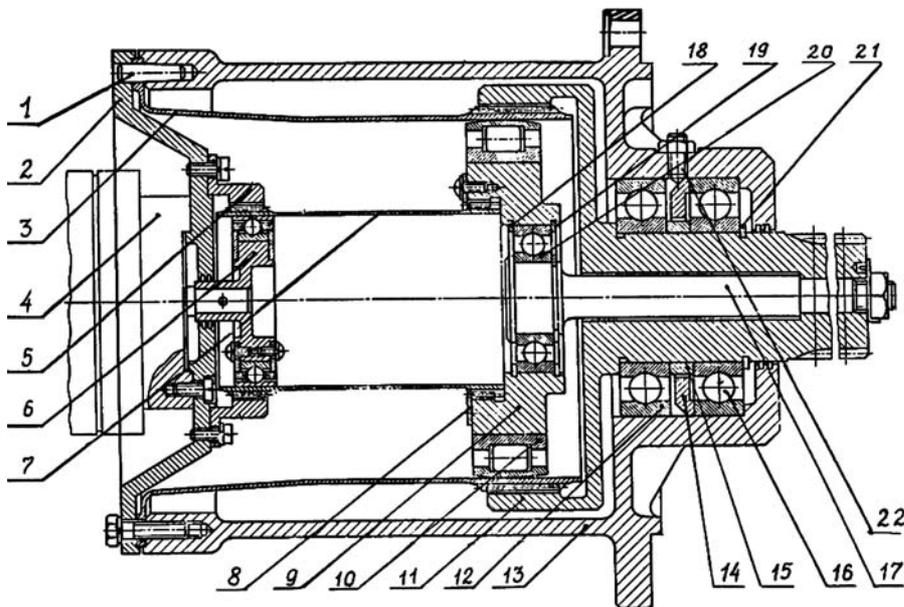


Рис. 2. Чертеж редуктора

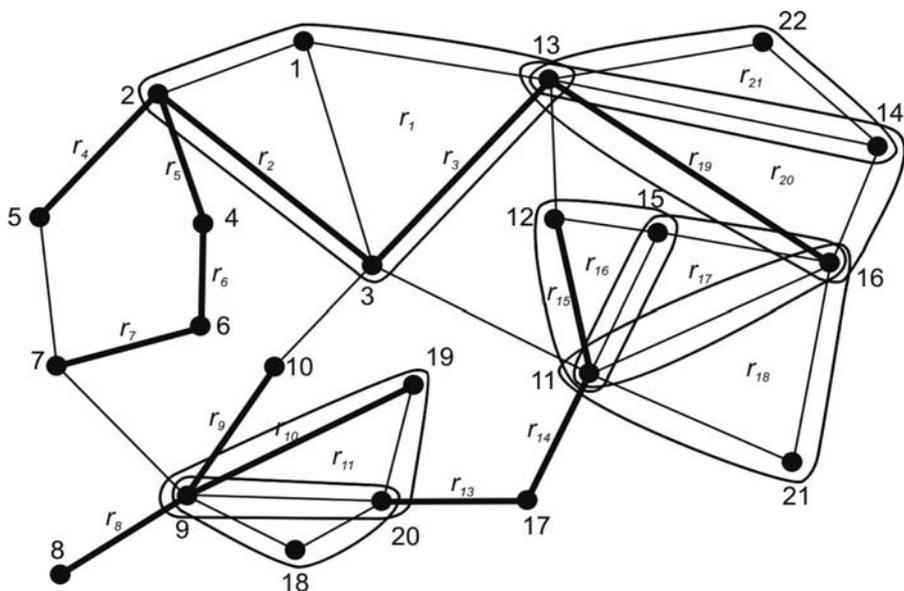


Рис. 3. Упрощенное изображение гиперсети редуктора

### Модель собираемости

**Определение 1.** Стягиванием ребра  $|X(r)|$  гиперграфа  $WS = (X, R, W)$  будем называть операцию, состоящую в удалении этого ребра и отождествлении всех инцидентных вершин.

**Определение 2.** Стягивание ребра  $X|(r)$  называется нормальным, если степень  $|X(r)|$  этого ребра  $r \in R$  равна 2.

**Определение 3.** Все вершины исходного гиперграфа  $WS = (X, R, W)$  назовем  $s$ -вершинами. Кроме того, вершина  $x_r \in X$ , образованная отождествлением двух  $s$ -вершин, соединенных ребром кратности 2, называется  $s$ -вершиной.

В процессе сборки изделия происходит реализация механических связей, соединяющих устанавливаемую деталь (сборочную единицу) с "собранным фрагментом изделия" и доставляющих данному элементу определенность геометрического положения относительно системы координат этого фрагмента. Абстрагируясь от конкретных технологических приемов получения соединений и сопряжений, представим реализацию каждой механической связи в виде стягивания соответствующего ребра вторичной сети  $WS$ . Во всех дальнейших операциях установленные элементы выступают как некоторая "целостность". Это позволяет представить их в виде некоторой  $s$ -вершины сети  $WS$ , образованной отождествлением всех вершин, инцидентным стянутым гиперребрам.

Итак, процесс сборки изделия  $X = \{x\}_{i=1}^N$  можно представить в виде последовательности стягиваний  $P(WS) = (WS_0 \dots WS_{N-1})$  вторичной сети  $WS = (X, R, W)$ , причем для  $P(WS)$  должны выполняться условия:

1.  $WS_0 = WS$ ;
2.  $WS_{N-1}$  представляет собой одновершинный гиперграф без гиперребер, описывающий изделие в сборе;
3. Каждое стягивание ребра является нормальным;
4. Для всех  $WS_j$  и  $WS_{j+1} \in P(WS)$ ,  $j = 0, N-2$ , выполняется соотношение

$$|R_j| - 1 = |R_{j+1}|.$$

Рассмотрим более подробно обоснованность самого неочевидного третьего условия. Для установки некоторой детали  $x_i$  необходимо, чтобы все детали из какой-либо совокупности  $X_j$ , образующей с  $x_i$  минимальное геометрически определенное множество, были скоординированы относительно друг друга. Только в этом случае они образуют внешнюю систему координат, определяющую положение  $x_i$ . По определению гиперсети минимальным геометрически определенным множествам деталей соответствуют ребра вторичной сети  $WS$ , а скоординированность деталей из  $X_j$  означает, что все механические связи, наложенные на элементы из  $X_j$ , реализованы. Иными словами, осуществлены опе-

рации удаления ребер, описывающих эти связи, и отождествление инцидентных вершин. Поэтому совокупности  $X_j$  соответствует одна вершина в некотором  $WS_k \in P(WS)$ . Таким образом, ребро  $r$ , соединяющее  $x_i$  и  $X_j$  в  $WS_k$ , имеет степень 2, а установка  $x_i$  на  $X_j$  описывается нормальным стягиванием соединяющего их ребра. Приведенные соображения можно проиллюстрировать примером, показанным на рис. 4, где изображена последовательность  $P(WS)$  нормальных стягиваний вторичной сети  $WS$  редуктора (см. рис. 2), переводящая  $WS$  из исходного состояния (см. рис. 3) в форму одновершинного гиперграфа.

На рис. 4 черными квадратами изображены составные вершины. Это вершины, состоящие из нескольких простых вершин, которые продуцирует процедура стягиваний вторичной сети. Так, гиперграф  $WS_4$  получается из вторичной сети  $WS = WS_0$  нормальным стягиванием по ребрам  $\{9, 10\}$ ,  $\{9, 19\}$ ,  $\{11, 12\}$  и  $\{11, 12, 15\}$ . Нормальные стягивания ребер гиперграфа  $WS_4$   $\{2, 5\}$ ,  $\{2, 4\}$ ,  $\{4, 6\}$ ,  $\{6, 7\}$ ,  $\{8, \{9, 10, 19\}\}$ ,  $\{\{9, 10, 19\}, 20\}$ ,  $\{18, 20\}$ ,  $\{9, 10, 19\}$  и  $\{17, 20\}$  дает гиперграф  $WS_{10}$  и т. д. до реализации всех связей и генерации конечного гиперграфа, состоящего из одной вершины.

Итак, структуру позиционных механических связей собираемых изделий можно представить в форме вторичной сети — гиперграфа, который последовательностью нормальных стягиваний трансформируется в одновершинный гиперграф без петель и голых ребер. В [1] доказаны необходимые условия реализуемости этой процедуры.

**Теорема.** Если гиперграф  $WS = (X, R, W)$  стягивается, то:

- 1) среди ребер  $WS$  существует по крайней мере одно ребро степени 2;
- 2) гиперграф является связным;
- 3) число вершин  $|X|$  и ребер  $|R|$  гиперграфа  $WS$  удовлетворяют линейному ограничению  $|X| = |R| + 1$ .

Не повторяя достаточно громоздкое формальное доказательство этой теоремы, приведем содержательные аргументы в пользу справедливости приведенных формулировок. Необходимость первого условия доказывает первая операция нормального стягивания, которая применяется к вершинам

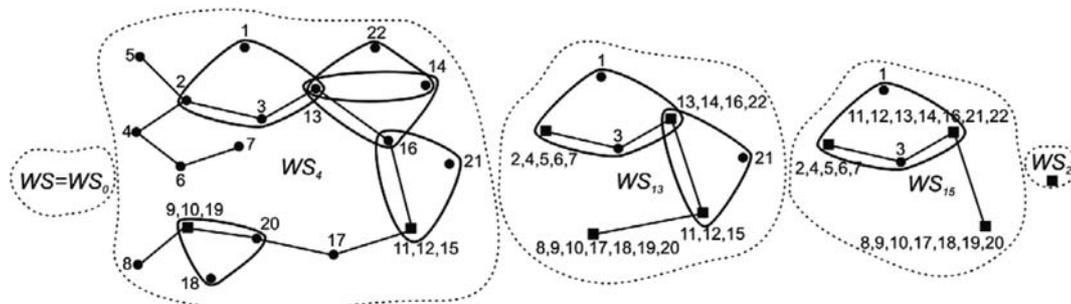


Рис. 4. Фрагмент последовательности нормальных стягиваний

исходного гиперграфа. Связность следует из существования последовательности нормальных стягиваний, переводящей гиперграф в точку. Рассмотрим более подробно третье условие.

Если  $H < V + 1$ , то гиперграф превращается в плохо скоординированную структуру, поскольку его наличных связей оказывается недостаточно для определения положения каждой вершины. Если  $H = V + 1$ , то гиперграф может стать настолько разреженным, что потеряет формальную связность. В случае  $H > V + 1$  появляются избыточные связи, которые влекут за собой эффект перебазирования. Так называется ситуация, когда устанавливаемая деталь или сборочная единица координируется одновременно по нескольким полным комплектам конструкторских баз.

Рассмотрим этот технологический феномен на примере, приведенном на рис. 5, а. Пусть среди всех связей, соединяющих устанавливаемую деталь  $u$  с собранным фрагментом  $WS_i$ , существуют, по крайней мере, две связи  $r_s, r_t$ , доставляющие  $u$  определенность геометрического расположения относительно  $WS_i$ . В этом случае элемент  $u$  должен быть скоординирован относительно  $WS_i$  по двум внешним координатным системам, которые образуют конструктивы связей  $r_s, r_t$ .

Эти конструктивы принадлежат одному собранному фрагменту  $WS_i$ , поэтому создается ситуация "избыточной скоординированности"  $u$ , когда для

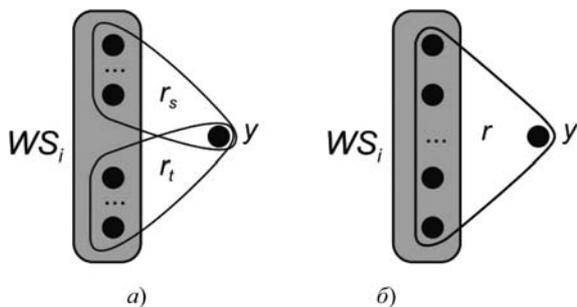


Рис. 5. Избыточная скоординированность и ее элиминация: а — избыточная скоординированность при установке  $u$ ; б — способ устранения лишних связей, заключающийся в ревизии исходной структуры связей

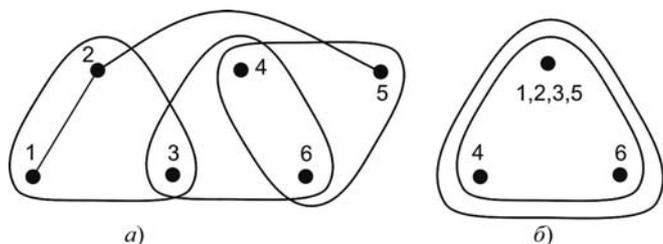


Рис. 6. Пример нестягиваемого гиперграфа шестого порядка: а — гиперграф в исходном состоянии; б — вид гиперграфа, к которому приводит любая последовательность нормальных стягиваний исходной структуры

установки этого элемента требуется реализовать два полных комплекта конструкторских баз. На стадии подготовки проектной документации перебазирование может порождать неразрешимые размерные цепи, а на стадии технологической подготовки производства оно влечет за собой радикальные изменения в составе и содержании технологических инструкций.

Для трехвершинных гиперграфов условия 1—3 являются необходимыми и достаточными. Достаточность можно проверить простым перебором небольшого числа неизоморфных трехвершинных гиперграфов, удовлетворяющих условиям 1—3. Для гиперграфов более высоких порядков они являются только необходимыми. Один из таких примеров показан на рис. 6, а. Любая последовательность нормальных стягиваний этого графа приводит к нестягиваемому фрагменту, изображенному на этом рисунке с правой стороны.

Вторичная сеть изделия — это весьма содержательная структурная модель, позволяющая решать множество важных конструкторских и технологических задач, которые требуют поиска фрагментов изделия, замкнутых по отношениям базирования и геометрической определенности. Это синтез последовательности сборки изделия, генерация порядка разборки в процессе ремонта или контроля, поиск кратчайших или устойчивых конструкторских размерных цепей, разбиение изделия на сборочные единицы и др. Рассмотрим один распространенный частный случай последней задачи.

### Модель расчленяемости

Большая часть машин и механических приборов в массовом и серийном производстве собираются из предварительно собранных частей — сборочных единиц. По ЕСКД сборочной единицей (СЕ) называется изделие, составные части которого подлежат соединению сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием и пр.). Если отвлечься от технологического содержания сборочных операций, то в данном определении самым важным аспектом является возможность реализации сборочной единицы независимо от других структурных частей изделия. Из условия независимости сборки следует, что для каждой своей детали сборочная единица содержит комплект конструкторских баз, которые определяют ее положение с точностью и полнотой, требуемыми чертежами и техническими условиями. Поэтому сборочная единица представляет собой совокупность деталей, которая обладает свойством замкнутости по множественному отношению базирования, а ее образом в гиперсети  $WS$  служит подгиперграф, для которого выполняются все необходимые условия стягиваемости 1—3.

Отметим, что требование независимости сборки является необходимым условием существования СЕ. Формулировка достаточных условий должна включать в себя многочисленные требования и ограничения, которые накладываются технологической и производственными системами. В общем случае выбор рациональной схемы декомпозиции изделия на сборочные единицы может быть представлен как многокритериальная задача математического программирования или задача группового принятия решений, где каждая частная функция выбора формализует выбор по одному решающему правилу [3]. Рассмотрим один важный частный случай, когда основанием для выбора лучшего проектного решения служит один критерий — минимальное число сопрягаемых поверхностей. Обоснованность этого решающего правила не подлежит сомнению, оно многократно подтверждено технологической практикой многих переделов и производств.

Пусть  $X = \{x_i\}_{i=1}^n$  — множество деталей некоторого изделия, а  $WS = (X, R, W)$  — вторичная этого изделия. Каждому ребру  $r_i \in R$  сопоставим число  $c_i$ , равное числу различных поверхностей, по которым сопрягаются все детали, входящие в  $X(r_i)$ , где  $X(r_i)$  обозначает все детали, инцидентные гиперребру  $r_i$ . Обозначим  $A = \|a_{ij}\|_{1 \times n}^{1 \times n+1}$  матрицу инцидентности гиперграфа  $WS$ . Элемент матрицы  $a_{ij} = 1$ , если  $i$ -е гиперребро инцидентно  $j$ -й вершине, и  $a_{ij} = 0$  — в противном случае.

Введем переменные:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е ребро входит в } j\text{-ю сборочную} \\ & \text{единицу;} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е ребро не входит ни в какую СЕ;} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$z_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если деталь } k \text{ входит в } j\text{-ю сборочную} \\ & \text{единицу;} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $i = \overline{1, n}$ ;  $k = \overline{1, n+1}$ ,  $j = \overline{1, q}$ ;  $n$  — число ребер гиперграфа  $WS$ ;  $q$  — число сборочных единиц.

Теперь задачу проектирования схемы членения изделия с минимальным числом сопряженных поверхностей между различными СЕ сформулируем как задачу дискретного математического программирования с целевой функцией

$$\sum_{i=1}^n c_i y_i \rightarrow \min.$$

Это выражение требует минимизации взвешенной суммы межзловых соединений в выбранной схеме разбиения изделия на сборочные единицы. Рассмотрим систему ограничений.

$$1. \sum_{j=1}^q x_{ij} + y_i = 1, i = \overline{1, n}. \text{ Каждое из этих } n \text{ уравнений}$$

служит математическим описанием условия, согласно которому каждое ребро входит в одну СЕ либо соединяет различные СЕ.

$$2. \sum_{j=1}^q z_{kj} = 1, k = \overline{1, n+1}. \text{ Эта система уравнений}$$

требует, чтобы каждая деталь принадлежала только одной сборочной единице. Иными словами, совокупность СЕ одного уровня иерархии должно быть разбиением множества деталей.

$$3. \sum_{i=1}^n x_{ij} + 1 = \sum_{k=1}^{n+1} z_{kj}, j = \overline{1, q}. \text{ Сумма } \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

равняется числу ребер гиперграфа  $WS$ , входящих в  $j$ -ю СЕ. Система уравнений 3 формализует линейное соотношение между вершинами и ребрами подгиперграфа, соответствующего каждой сборочной единице.

$$4. \forall i = \overline{1, n} \quad \forall j = \overline{1, q} \quad \text{если } x_{ij} = 1, \text{ то } \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} z_{kj} =$$

$$\sum_{k=1}^{n+1} a_{ik}. \text{ То есть если } i\text{-е ребро принадлежит } j\text{-й СЕ, то и все вершины, инцидентные этому ребру, принадлежат } j\text{-й сборочной единице. Для того чтобы}$$

это логическое условие привести к стандартной алгебраической форме, введем вспомогательные переменные  $t_{ij} \in \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, q}$ . Используя эти переменные, запишем логическое условие в виде системы ограничений:

$$x_{ij} = t_{ij}, \quad \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} z_{kj} \geq \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} t_{ij}; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, q}.$$

Действительно, если  $t_{ij} = 1$ , то алгебраические ограничения принимают исходную форму логических выражений. Когда  $t_{ij} = 0$ , то все  $x_{ij} = 0$  и неравенства

$$\sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} z_{kj} \geq 0 \text{ выполняются автоматически.}$$

$$5. \sum_{i=1}^n y_i > 0. \text{ Это условие означает, что разбиение}$$

изделия на сборочные единицы не может быть тривиальным, т. е. состоять из одной СЕ.

Ограничения, заданные уравнениями и неравенствами 1—5, формализуют базовые условия существования сборочных единиц. Эта система является открытой, она может быть пополнена дополнительными соотношениями, описывающими условия сборки в конкретной производственной ситуации.

Так, некоторые организационные формы сборочного производства регламентируют "емкость" сборочных единиц. Это требование можно записать

$$m_j \leq \sum_{k=1}^{n+1} z_{kj} \leq M_j, \text{ где } m_j, M_j — \text{минимальное}$$

и максимальное число деталей в  $j$ -й СЕ.

Очень часто на сборку изделия накладывается условие, по которому детали  $x_j$  и  $x_m$  должны входить в одну сборочную единицу. Это, например, требуется, когда детали некоторыми своими размерами участвуют в формировании одной конструкторской размерной цепи, или эти детали нужны для выполнения контрольной операции. Для формализации этого условия достаточно потребовать  $z_{lj} = z_{mj} = 1$  для некоторого  $1 \leq j \leq q$ .

Все описанные ограничения задаются линейными равенствами и неравенствами, целевая функция — линейной формой, а переменные принимают два целочисленных значения 0 и 1, поэтому модель относится к задачам линейного программирования с булевыми переменными. Этот класс задач достаточно хорошо разработан, и для их решения предложено множество точных и приближенных методов решения, например, различные варианты метода отсечения, метод границ и ветвей и пр.

### Выводы

- ◆ Расчленяемость и собираемость — это структурные характеристики технической системы, которые зависят от вида и распределения позиционных механических связей, определяющих положение элементов системы (деталей и сборочных единиц) относительно друг друга.
- ◆ Пространственная координация технической системы в общем случае представляет собой отношение переменной местности, заданное на множестве ее элементов. Адекватным описанием этого отношения является гиперсеть, состоящая из первичной и вторичной сетей, определенных на общем носителе.
- ◆ Первичная сеть — это граф механических связей, описывающий соединения и сопряжения изделия. Вторичная сеть представляет собой гиперграф, который доставляет информацию о взаимной координации элементов технической системы. Первичная сеть служит для верификации проектных решений и для синтеза вторичной сети — основного источника структурных данных об изделии.

- ◆ Процесс сборки изделия можно описать как последовательность нормальных стягиваний ребер вторичной сети. Доказаны необходимые условия нормальной стягиваемости гиперграфов. Эти условия выражены в терминах, которые хорошо согласуются с опытом технологического проектирования и допускают практическую проверку.
- ◆ Гиперсетевая модель изделия позволяет поставить и решить множество важных конструкторских и технологических задач, основанных на синтезе фрагментов изделия, замкнутых по отношению базирования и геометрической определенности, например, разработка последовательности общей и узловых сборки, генерация схемы сборочного состава и др.
- ◆ Важным частным случаем задачи структурной декомпозиции является разбиение изделия на сборочные единицы по критерию минимума сопрягаемых поверхностей. Предложена формализация этой задачи, основанная на понятийном аппарате гиперсетей и выраженная в терминах дискретного математического программирования.
- ◆ Гиперсетевая модель отличается высокой толерантностью. Она хорошо сочетается с другими формальными средствами, описывающими свойства изделия на различных стадиях жизненного цикла. Ее можно использовать совместно с моделями, описывающими условия геометрического доступа, моделями принятия рациональных решений и оптимизации и пр.

### Список литературы

1. Божко А. Н., Бетин Е. А. Анализ стягиваемости гиперграфов // Информационные технологии. 2005. № 5. С. 6—12.
2. Божко А. Н. Моделирование механических связей изделия // Электронное научно-техническое издание "Наука и образование". 2011. № 3.
3. Диалоговое проектирование технологических процессов / Н. М. Капустин, В. В. Павлов, Л. А. Козлов и др. М.: Машиностроение, 1983. 255 с.
4. Осетров В. Г., Свитковский Ф. Ю. Логика и практика сборки машин. Ижевск: ИжГТУ, 1996. 86 с.
5. Павлов В. В. Математическое обеспечение САПР в производстве летательных аппаратов. М.: МФТИ, 1978. 68 с.
6. Попков В. К. Математические модели связности. Новосибирск: ИВМ и МГ СО РАН, 2006. 490 с.
7. Своятыцкий Д. А. Моделирование процессов сборки в робототехнических комплексах. Минск: Наука и техника, 1983. 88 с.
8. Тимковский В. Б. Дискретная математика в мире станков и деталей. М.: Наука, 1992. 145 с.
9. Челищев Б. Е., Боброва И. В., Гонсалес-Сабатер А. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.

**Е. И. Афиногенов**, аспирант,  
**Т. М. Волосатова**, канд. техн. наук, доц.,  
**Н. И. Сельвесюк**, д-р техн. наук, проф.,  
**Н. В. Чичварин**, канд. техн. наук, доц.,  
 Московский государственный  
 технический университет им. Н. Э. Баумана,  
 e-mail: tamaravol@gmail.com

## **Системный подход к проектированию алгоритмов информационно-управляющей системы летательного аппарата с учетом противодействия информационным подсистемам<sup>1</sup>**

*Предложен новый подход к решению задачи выбора структуры закона управления полетом летательного аппарата (ЛА). Подход основан на построении обобщенной модели информационных подсистем комплекса средств управления полетом ЛА. Модель учитывает внешние и внутренние помехи. Результатом их применения должно стать множество эквивалентных законов управления, которое можно использовать для решения задачи обеспечения работоспособности при наличии помех в информационной части бортового комплекса. В основу решения указанной задачи положен блочно-иерархический метод модельного представления объекта проектирования и CALS-технологии.*

**Ключевые слова:** летательный аппарат, модель, комплекс, закон управления, информационная подсистема

### **Введение**

Эффективность выполнения задач управления различными типами летательных аппаратов (ЛА) напрямую зависит от точности и работоспособности информационно-управляющих систем, входящих в состав бортового комплекса. Однако реализованные в настоящее время на борту ЛА алгоритмы управления получены, как правило, на основе частотных методов синтеза и имеют ограниченные возможности по компенсации внешних и параметрических возмущений. При выборе структуры закона управления не учитываются факторы частичной потери работоспособности отдельных подсистем под действием естественных помех либо при неполностью скомпенсированном противодействии информационным подсистемам.

В данной работе предложен подход к проектированию, основанный на построении обобщенной

модели информационных подсистем комплекса средств управления полетом ЛА, учитывающей внешние и внутренние помехи. Использование указанного подхода позволит обеспечить работоспособность системы управления ЛА при наличии помех в информационной части бортового комплекса. В основу решения задачи положен блочно-иерархический метод модельного представления объекта проектирования и CALS-технологии.

### **1. Формализованное описание постановки задачи исследования**

Для реализации предлагаемого подхода необходимо решить следующие задачи:

- выбрать формы представления математической модели объекта управления;
- провести анализ помех информационной части;
- осуществить формализацию описания аппаратных сбоях, обусловленных внешними и внутренними помехами;
- выбрать модели систем информационного сопровождения навигации (радиоэлектронной системы — РЭС и оптико-электронной системы — ОЭС);
- построить обобщенную модель канала передачи сообщений (КПС) в комплексе средств управления ЛА, учитывающей действие помех. Под сообщениями понимаются:
  - сигналы, несущие данные о координатах ЛА в связной и траекторной системах координат;
  - изображения, продуцируемые радиоэлектронными и оптико-электронными системами навигации;
  - сигналы, передаваемые по линиям связи;
  - управляющие воздействия.

В соответствии с концепцией современной теории автоматического управления [1—4, 10] при организации управления самолетом на всех этапах полета решаются задачи формирования заданной траектории (ЗТ) и стабилизации самолета относительно ЗТ. ЗТ определяется исходя из соображений достижения целей применения ЛА эвристически либо методами оптимизации [1]. ЗТ воспроизводится в полете с помощью вычислителей управляющих систем верхнего уровня.

Решение задачи стабилизации ЗТ  $x^*(t)$  (заданного фазового вектора  $x^*$ , в состав которого в общем случае входят параметры траектории) возлагается на систему автоматического управления (САУ). При разработке алгоритмов САУ, помимо основной задачи стабилизации с заданным качеством переходных процессов, должны решаться задачи компенсации возмущений различной природы в целях обеспечения заданной точности управления. Указанные свойства алгоритмов управления должны сохраняться и при целенаправленном воздействии на информационные подсистемы ЛА.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ № МД-1248.2011.8.

## 2. Структура канала передачи сообщений

Под КПС в работе понимается информационно-управляющая система (ИУС) бортового комплекса ЛА, состоящая из технических средств передачи и приема данных, включая линии связи, а также из алгоритмического обеспечения и протоколов взаимодействия. Под окончательным оборудованием обработки данных понимается часть аппаратуры передающего или принимающего устройства, обеспечивающая преобразование исходного сообщения в форму его представления в канале для передачи по линиям связи.

В рамках данной работы совокупность параметров  $Z$  канала передачи защищенных сообщений рассматривается в составе двух подмножеств — параметров аппаратного  $Y$  и алгоритмического  $X$  обеспечения:

$$Z = X \cup Y.$$

Решение задачи передачи сообщений в самом общем виде обеспечивается преобразованием элементов пространства событий в пространство сообщений с использованием передатчика и обратного преобразования элементов пространства сообщений в пространство событий с использованием приемника. Структурой канала предусматривается влияние внутренних шумов системы на узлы передатчика и приемника, а также приложение внешних шумов в виде атак активного и пассивного типов к элементам пространства сообщений. Структурная схема КПС представлена на рис. 1.

Поскольку КПС как объект проектирования является совокупностью компонентов разной физической природы, к анализу структуры канала и построению требуемой модели необходимо применять блочно-иерархический подход. Это позволяет получить наибольший эффект от декомпозиции целостной сущности рассматриваемого объекта на отдельные уровни в соответствии с функциональностью, которой они обладают.

Структура КПС включает пять уровней (рис. 2): архитектурный, функционально-логический, системотехнический, схемотехнический, физический.

Архитектурный уровень соответствует степени детализации объекта проектирования, не требующей учета физического и логического носителя сигнала (сообщения), а также внутренней структуры подсистем передачи сообщений. На данном уровне иерархической структуры рассматриваются модели топологий каналов беспроводных соединений, правила и условия их построения.

Модели функционально-логического уровня строят для решения задач согласования подсистем, входящих в состав канала передачи сообщений.

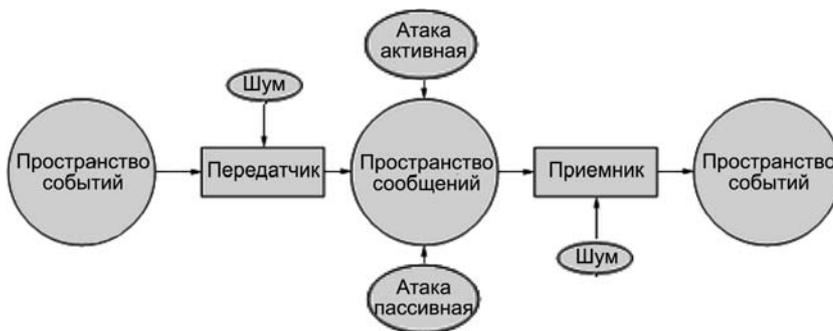


Рис. 1. Обобщенная схема канала передачи сообщений

В перечень задач, решаемых на данном уровне, входит контроль качества передачи сообщений, а также их защита от внешних помех.

Системотехнический уровень соответствует степени детализации в приближении моделей "черный ящик" или "серый ящик". Подсистемы данного уровня выполняют функции кодирования логических сигналов (сообщений) для их передачи физическим носителям в канале беспроводного соединения.

На схемотехническом уровне в модельном представлении объекта проектирования учитывается физическая природа носителей сигнала совместно с характером преобразования в отдельных моделях типа "черный ящик".

На физическом уровне модель КПС рассматривается с учетом физической природы как носителя сообщений, так и носителей сигналов (электромагнитное излучение, электрический ток). Рассматриваются используемые в информационно-управляющем комплексе ЛА:

- радиоэлектронный канал передачи сообщений;
- оптико-электронный канал передачи сообщений.

На физическом уровне иерархической структуры канала передачи сообщений выполняются работы по проектированию совместимости устройств, входящих в соединение, и средств подавления противодействия в виде помех. Также на данном уровне рассматриваются аспекты взаимодействия устройств



Рис. 2. Иерархическая структура модели обобщенного КПС

и помех в форме физических сигналов (в частности, радиоэлектронная совместимость).

Рассматривая методики проектирования каналов в удовлетворяющих данному требованию стандартах, можно сделать выводы о существовании потенциальных проблем в структуре каналов:

- на архитектурном уровне (существующие топологии допускают несанкционированное подключение, прослушивание эфира и подмену узлов соединений);
- на функционально-логическом уровне (применяемые методики защиты каналов в ряде случаев являются криптографически слабыми по отношению к методам криптоанализа. Особенно это существенно для систем типа "свой—чужой");
- на схемотехническом и физическом уровне воздействие активных и пассивных помех рассматривают методически отдельно для радиоэлектронных и оптико-электронных систем. Для выработки единого подхода к моделированию воздействия внешних и внутренних помех далее рассматриваются структуры РЭС и ОЭС.

### 3. Структуры информационных подсистем в составе ИУС ЛА

#### 3.1. Структура РЭС в составе ИУС ЛА

Область адекватности математической модели РЭС в аспекте рассматриваемых в статье задач определяется основными требованиями информационной безопасности КПС и задачами, которые ставятся и решаются для ее обеспечения. При этом учитывают две возможные технологии принятия проектных решений при разработке методов и средств защиты КПС:

- технология разработки методов и средств защиты уже разработанных КПС;
- технология разработки методов и средств защиты КПС на всех стадиях разработки и изготовления.

По первой технологии требуется разработка дополнительных средств без вмешательства в объект защиты. Вторая разновидность технологии допускает вмешательство в проектные решения, касающиеся структуры и конструктивных параметров КПС, как объекта проектирования.

Основное требование к области адекватности модели КПС — это обеспечение возможности определять последствия теоретически возможных атак на субъект защиты. Кроме того, модель должна обеспечивать возможность принимать проектные решения для существующих и перспективных КПС.

Модель РЭС в составе ИУС ЛА рассматривается на основе классификации по функциональному признаку, приведенной на рис. 3.

В различных устройствах РЭС (преобразователе сообщения в электрический сигнал, передатчике, модуляторе, демодуляторе) на стадиях передачи,

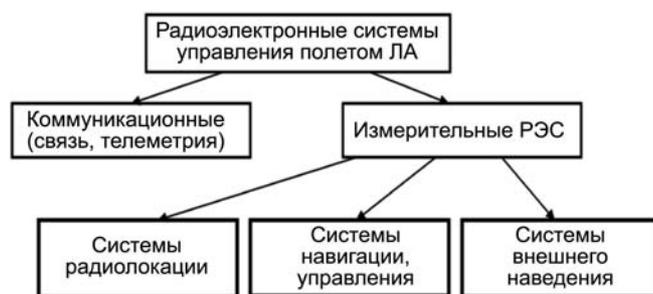


Рис. 3. Классификация РЭС

извлечения, обработки и накопления информации используют различные виды сигналов. Это предопределяет множество вероятных атак на соответствующие КПС. В зависимости от характера сообщений и применяемых сигналов будем различать непрерывные, импульсные и цифровые РЭС.

В непрерывных системах на основных этапах преобразования сообщения имеют непрерывный характер и отображаются в непрерывные изменения одного или нескольких параметров радиосигнала. К таким системам относят системы радиовещания и телевидения, некоторые типы навигационных систем. Для организации активных атак на КПС очевидно применение широкополосных заградительных помех. Данные КПС на уровне сигналов наиболее уязвимы при пассивной атаке (внедрении).

В импульсных РЭС информация содержится в изменениях параметров импульсных радиосигналов. Типичными представителями таких систем являются импульсные бортовые радиолокационные станции и системы передачи информации с импульсной модуляцией. На физическом уровне КПС, реализуемые импульсными РЭС, менее уязвимы при организации активных атак в виде широкополосных заградительных помех, поскольку могут быть построены на основе псевдослучайной манипуляции частотой несущей.

В цифровых РЭС сообщения отображаются в кодовые комбинации. Число различных символов, из которых состоят кодовые комбинации, называется основанием кода. Код может быть реализован на основе методов криптографии. Кроме того, различные символы кодовой комбинации передаются соответствующими радиосигналами. Данные КПС на уровне сигналов наименее уязвимы при пассивной атаке (внедрении).

Приведенная классификация позволяет выявить особенности РЭС в составе ИУС ЛА и учесть их при проектировании методов защиты от помех.

С точки зрения построения обобщенной модели РЭС важным и существенным отличительным признаком измерительных РЭС является то, что в них проводится обработка пространственно-временных сигналов. Эта обработка предполагает наличие в тракте обработки сканирующего устройства, пре-

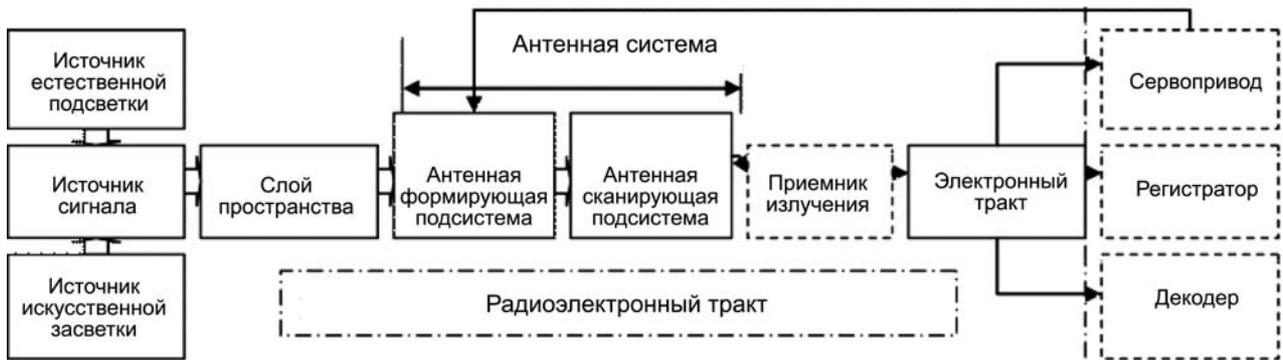


Рис. 4. Функциональная схема обобщенной измерительной РЭС

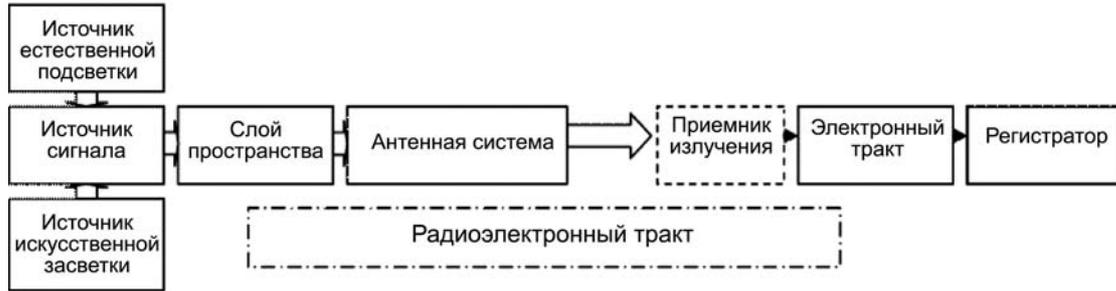


Рис. 5. Функциональная схема обобщенной РЭС связи

образующего пространственный сигнал, носителем которого является электромагнитное излучение, в сигнал временной, который преобразуется приемником излучения в электрический ток и обрабатывается в электронном тракте.

Характерным признаком систем связи (коммуникационных) является использование электромагнитного излучения в них только для передачи временного сигнала, несущего сообщение, поэтому сканирующего устройства, непосредственно участвующего в обработке пространственного сигнала, в таких РЭС нет. Этот фактор учтен при построении функциональных схем и математических моделей РЭС в двух модификациях (рис. 4, 5).

В зависимости от назначения РЭС в модели предусмотрены следующие устройства оконечных компонентов систем: сервопривод, регистратор, декодер (восстанавливающее звено).

*Сервопривод* — исполнительный механизм в системах самонаведения и навигации моделируется как подсистема, преобразующая временные сигналы.

*Регистратор* — устройство записи сообщений, передаваемых в РЭС. Моделируется как подсистема, преобразующая временные сигналы.

*Декодер* (восстанавливающее звено) — устройство, преобразующее временной сигнал в пространственный.

### 3.2. Структура ОЭС в составе комплекса управления полетом ЛА

Выбор модели и ее доработка выполнены на основе анализа, проведенного по источникам [7—9]. На рис. 6 представлена классификация ОЭС в составе ИУС ЛА.

В соответствии с приведенной классификацией можно утверждать, что ОЭС независимо от назначения и решаемых задач должна содержать:

- канал обработки оптического сигнала, носителем которого является электромагнитное излучение;
- элемент, меняющий математическую размерность обрабатываемого сигнала (перевод пространственного распределения освещенности в плоскости изображения в поток, зависящий от времени);
- элемент, меняющий физическую размерность обрабатываемого сигнала (фотоприемник).



Рис. 6. Классификация ОЭС в составе ИУС ЛА

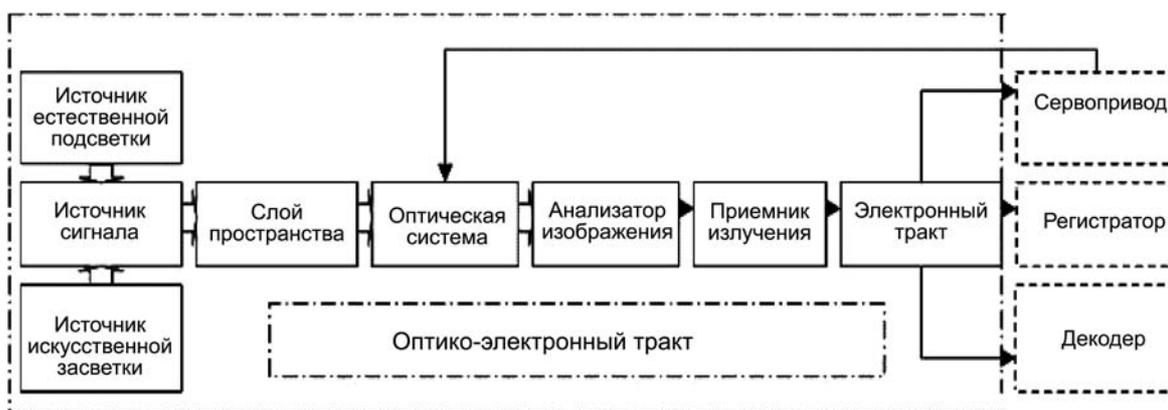


Рис. 7. Функциональная схема обобщенной ОЭС

Как показал предварительный анализ, характер сканирования и тип чувствительных элементов фотоприемника принципиально определяют структуру ОЭС как объекта проектирования. Структурная модель обобщенной ОЭС из состава ИУС ЛА представлена на рис. 7.

Основные допущения, принятые при построении модели:

- все сигналы, носителями которых является электромагнитное излучение, аддитивны;
- случайные сигналы, порождаемые источниками фонового излучения в пространстве предметов, а также шумы приемника излучения и электронного тракта, тоже аддитивны.

Модель рассматривается в трех модификациях в соответствии с результатами анализа, проведенного на основе определения ОЭС как объекта проектирования, состоящего из двух основных компонентов:

- неизменной подсистемы, обеспечивающей предварительную обработку сигнала;
- подсистемы, состав и назначение которой определяет функциональное назначение ОЭС в целом.

В первой модификации окончательных каскадов реализуется модельное представление структуры ОЭС измерительного типа с обратной связью (например, подсистемы, обеспечивающие автоматическую фокусировку, стабилизацию изображения, управление экспозицией, автоматические прицельные станции).

Во второй модификации рассматривается модель структуры информационной ОЭС, окончательным каскадом которой является зрительный анализатор человека-оператора (например, ТВ-система, тепловизор и т. п.).

В третьей модификации окончательных каскадов реализуется модельное представление структуры ОЭС измерительного типа с обработкой и отображением данных, не являющихся изображениями (например, лазерные дальномеры).

Регистратор представляет собой устройство, выполняющее функции отображения результатов измерений в виде изображений (например индикатор на лобовом стекле). Сервопривод представ-

ляет собой устройство обработки измеренного параметра (например, в случае следящего пеленгатора — это механизм поворота объектива). Под декодером понимается устройство, восстанавливающее изображение по закону сканирования, который передается от анализатора (кодера) по шине "Синхросигнал". Блок "Оптико-электронный тракт" (см. рис. 7) в рассматриваемой структуре является неизменным компонентом любой оптико-электронной системы. В формировании аппаратной функции его свойства играют определяющую роль.

#### 4. Анализ возможности моделирования помех и средств атак на информационную подсистему

##### 4.1. Моделирование внешних воздействий на РЭС [6]

Средства постановки активных помех — радиоэлектронное подавление (РЭП) нарушает работу или снижает эффективность систем управления полетом ЛА. Предусматривается создание преднамеренных помех, маскирующих и подавляющих полезные сигналы или же несущих дезинформацию. Создание преднамеренных помех проводится в сочетании с огневом поражением РЭС, в том числе на основе наведения (самонаведения) средств поражения на источники излучения.

Основными видами преднамеренных помех, создаваемых средствами РЭП, являются:

- маскирующие (подавляющие) активные помехи;
- имитирующие (дезинформирующие) активные помехи;
- маскирующие пассивные помехи;
- имитирующие пассивные помехи.

*Активными маскирующими помехами* называют прямые радиоизлучения, нарушающие работу РЭС путем маскировки принимаемых полезных сигналов на их фоне. При неустранимых нелинейностях каскадов приемника интенсивные помехи этого вида подавляют (блокируют) полезные сигналы.

Маскирующие активные помехи могут излучаться в виде усиленных шумов или вырезок из

них, в виде частотно- или амплитудно-частотно-модулированных шумом колебаний или в виде хаотических импульсных последовательностей. Возможно скольжение по частоте в пределах известного частотного диапазона. Средства создания активных радиопомех многообразного использования называют также станциями помех.

*Имитирующие (дезинформирующие) помехи* — это помехи, трудно отличимые от полезных сигналов РЭС, но несущие дезинформацию. Имитирующие помехи не создают сплошного маскирующего и подавляющего фона полезным сигналам, и потому реализуются при меньших средних мощностях излучения, чем маскирующие помехи. Характер дезинформации зависит от назначения и специфики РЭС. Задачей дезинформации РЭС наведения средств поражения является срыв работы локационных систем автоматического управления ЛА (по дальности, угловым координатам, высоте).

Анализ показывает, что рассмотренные помехи можно учитывать в рассматриваемой модели РЭС как случайный процесс совместно с воздействием фонов и шумов электронного тракта. При этом с помощью модели решаются классические задачи теории обнаружения. Для этого модель должна обеспечивать определение соотношения сигнал/шум. Определение этого соотношения, в свою очередь, позволяет оценить стохастические ошибки при измерении навигационных данных.

#### 4.2. Моделирование внешних воздействий на ОЭС

Основными видами фоновых засветок, оказывающих влияние на функционирование ОЭС в комплексе

средств управления полетом ЛА, являются пассивные и активные пространственно-временные помехи.

*Пассивные помехи* — это в основном ложные тепловые цели (ЛТЦ). ЛТЦ применяют для противодействия управлению беспилотными ЛА и самонаводящимися ракетами с тепловыми головками самонаведения. Поскольку момент применения ЛТЦ и попадания в поле зрения навигационной ОЭС непредсказуемы, их воздействие можно моделировать как случайный процесс.

*Активные помехи* — это воздействие на ОЭС лазерным излучением произвольного спектрального состава. Используется эффект так называемого ретроотражения, согласно которому даже засветки вне поля зрения воспринимаются оптико-электронным трактом при достаточно мощном излучении. Несмотря на то что это вполне детерминированный фактор, момент применения лазера, характер излучения и угол пеленга непредсказуемы. Поэтому такого рода воздействие также рассматривается как случайный процесс. Как и в случае РЭС, модельное представление помех в оптико-электронном тракте возможно и достаточно эффективно на системотехническом уровне с использованием модели типа "черный ящик".

#### 5. Обобщенная модель информационной подсистемы ИУС ЛА с учетом воздействия помех

Обобщенная структурная модель КПС представлена на рис. 8.

Так как предметом рассмотрения является модельное представление обобщенного КПС с учетом

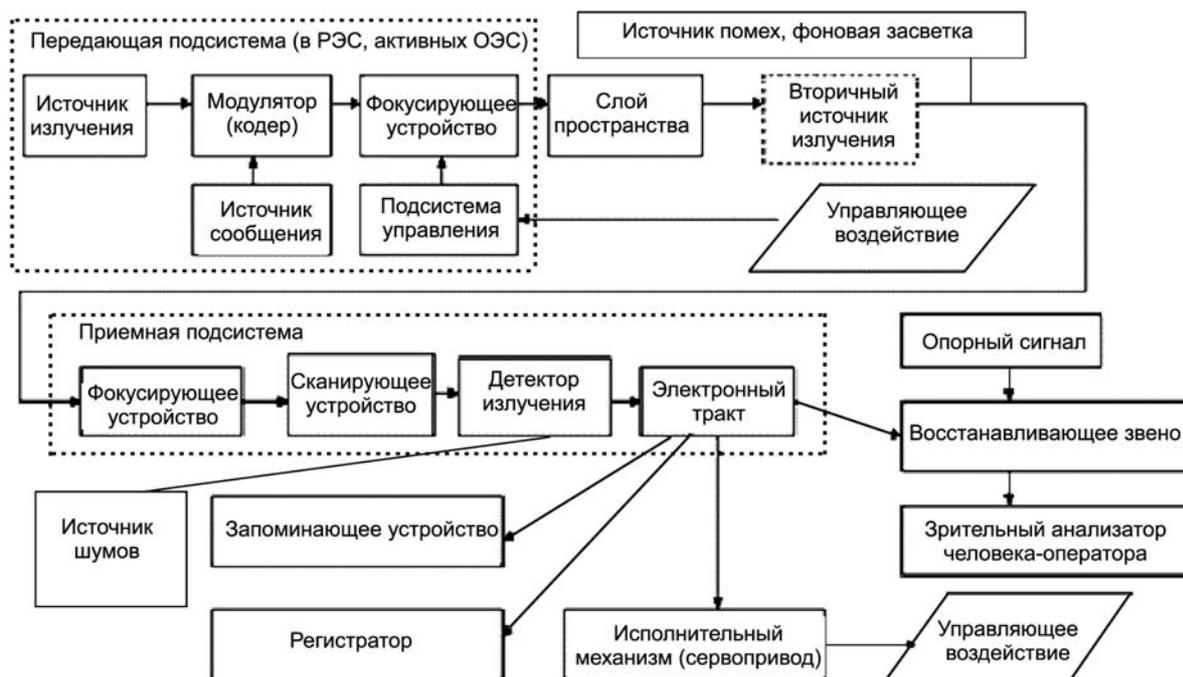


Рис. 8. Обобщенная структурная модель КПС



Рис. 9. Обобщенная структурная модель приемной подсистемы КПС

воздействия помех, далее рассматривается только приемная подсистема, модель которой формально одинакова как для РЭС, так и для ОЭС (рис. 9).

Рассматриваемую структуру можно представить в форме, удобной для построения математической модели в виде следующей последовательности звеньев:

- источник пространственного сигнала (детерминированного либо аддитивной смеси сигнала и фона);
- слой пространства — пространственный фильтр с распределенными параметрами, преобразующий пространственный входной сигнал в пространственный выходной;
- фокусирующее устройство (антенна в РЭС, объектив в ОЭС) — пространственный фильтр с сосредоточенными параметрами, преобразующий пространственный входной сигнал в пространственный выходной;
- сканирующее устройство (сканер в РЭС, анализатор изображения в ОЭС), преобразующее пространственный сигнал во временной;
- электронный тракт — временной фильтр, преобразующий входной временной сигнал в выходной временной.

В перечисленной последовательности с однородных позиций можно моделировать преобразование детерминированного и случайного сигналов. Она описывается как совокупность линейных фильтров. Это существенно, поскольку нелинейности рассматриваются на схемотехническом уровне, где они являются своеобразной "платой" за элементную базу, и на физическом уровне, где их учет является существенным (АЦП, ЦАП, вентиль и т. п.).

## 6. Математические модели звеньев тракта КПС в детерминированном приближении

Обобщенный двумерный фильтр [7] (рис. 10) преобразует входные сигналы  $s(P)$  в выходные

(преобразованные) сигналы  $\sigma(Q)$ , где точка  $P(x, y)$  принадлежит пространству входных сигналов,  $Q(x', y')$  — пространству преобразованных сигналов.

При этом операторы поведения имеют вид интегралов свертки:

$$I_{\text{ВЫХ}}(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \times H_{\beta}(x' - \beta x, y' - \beta y) dx dy;$$

$$I_{\text{ВЫХ}}(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} I\left(\frac{x}{\beta}, \frac{y}{\beta}\right) \left(\frac{1}{\beta^2}\right) \times H_{\beta}(x' - x, y' - y) dx dy,$$

где  $I_{\text{ВЫХ}}(x', y')$  — распределение интенсивности в идеальном изображении (копии);  $\beta$  — коэффициент увеличения;  $H_{\beta}(*, *)$  — импульсный отклик фильтра.

Обобщенный одномерный фильтр описывается аналогичным образом.

Математическая модель пространственно-временного фильтра приведена в работе [7]. Поток на выходе фильтра определяется зависимостью

$$\begin{aligned} \Phi(x_p, y_p, \varphi_p) = \\ = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x', y') A(x' - x_p, y' - y_p, \varphi_p) dx' dy', \end{aligned}$$

где  $E(x', y')$  — распределение интенсивности в плоскости сканирования;  $A(x', y')$  — функция пропускания, импульсный отклик фильтра.

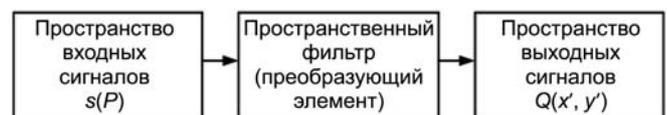


Рис. 10. Обобщенная двумерная модель пространственного фильтра

При сканировании  $x_p = x_p(t)$ ,  $y_p = y_p(t)$ ,  $\varphi_p = \varphi_p(t)$ . В этом случае поток на выходе фильтра будет функцией времени, т. е.

$$\Phi(x_p, y_p, \varphi_p) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} E(x', y') A(x' - x_p, y' - y_p, \varphi_p) dx' dy'.$$

Зависимости  $x_p(t)$ ,  $y_p(t)$ ,  $\varphi_p(t)$  описывают закон сканирования. Они позволяют в общем случае найти поток излучения на выходе фильтра. При его произвольном законе движения и неподвижном анализируемом распределении интенсивности (обычно при анализе изображения) принимается допущение о том, что функция распределения  $E(x', y')$  в течение анализа не изменяется.

В большинстве современных и перспективных сканеров имеет место только поступательное строчно-кадровое движение, т. е.  $x_p = x_p(t)$ ,  $y_p = y_p(t)$ ,  $\varphi_p(t) = 0$ , тогда

$$\Phi_t = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} E(x', y') A(x' - x_p(t), y' - y_p(t)) dx' dy'.$$

*Математическая модель временного фильтра.* Для линейной инвариантной во времени электронной системы реакция на входное воздействие  $u_{\text{вх}}(t)$  определяется выражением

$$u_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(\tau) H_{\text{ef}}(t - \tau) d\tau = \int_0^t u_{\text{вх}}(\tau) H_{\text{ef}}(t - \tau) d\tau,$$

где  $H_{\text{ef}}(t)$  — импульсный отклик электронной системы.

Для реальных временных физических систем всегда выполняется условие  $H_{\text{ef}}(t - \tau) = 0$  при всех  $t > \tau$ , т. е. при отрицательном аргументе функция  $H_{\text{ef}}(t - \tau)$  должна обращаться в ноль, так как отклик системы не может опережать входное воздействие в момент времени  $t$ . Поэтому подынтегральное выражение обращается в ноль. Применяя для обеих частей свертки преобразование Фурье, получим

$$\hat{u}_{\text{вых}}(v_l) = \hat{u}_{\text{вх}}(v_l) \tilde{H}_{\text{ef}}(v_l),$$

где  $\tilde{H}_{\text{ef}}(v_l)$  — передаточная функция электронного тракта (ЭТ).

Если на вход линейного ЭТ поступает периодический сигнал, то  $n$ -я гармоника сигнала на выходе и входе связаны соотношением

$$u_n^{\text{вых}} = u_n^{\text{вх}} \tilde{H}_{\text{ef}}(v_m).$$

*Математическая модель детектора (приемника) излучения (ДИ).* Принимается, что относительная

спектральная вольтовая (токовая) чувствительность ДИ  $S_{\lambda}^{\text{отн}}$  есть отношение вольтовой (токовой) спектральной чувствительности  $S_{\lambda}$  к ее максимальному значению  $S_{\lambda}^{\text{max}}$ :

$$S_{\lambda}^{\text{отн}} = S_{\lambda} / S_{\lambda}^{\text{max}}.$$

При облучении ДИ интегральным синусоидально-модулированным лучистым потоком амплитуда напряжения на выходе ДИ

$$U_n = S_{\lambda}^{\text{max}} \int_0^{\infty} \Phi_{n\lambda} S_{\lambda}^{\text{отн}} d\lambda,$$

где  $\Phi_{n\lambda}$  — амплитуда монохроматического лучистого потока.

Интегральная вольтовая чувствительность

$$S_u = S_{\lambda}^{\text{max}} \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{n\lambda} S_{\lambda}^{\text{отн}} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{n\lambda} d\lambda}.$$

Коэффициент использования ДИ представляет собой отношение

$$K^{\text{isp}} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{n\lambda} S_{\lambda}^{\text{отн}} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{n\lambda} d\lambda},$$

где  $\Phi_{n\lambda}^{\text{отн}} = \Phi_{n\lambda} / \Phi_{n\lambda}^{\text{max}}$ ;  $\Phi_{n\lambda}^{\text{max}}$  — максимальное значение монохроматического потока электромагнитного излучения.

Эффективный (для данного ДИ) поток электромагнитного излучения

$$\Phi^{\text{ef}} = \Phi_{n\lambda}^{\text{max}} \int_0^{\infty} \Phi_{n\lambda}^{\text{отн}} S_{\lambda}^{\text{отн}} d\lambda.$$

Инерционные свойства ДИ характеризуются его постоянной времени  $\tau_p$ , или частотной характеристикой, которую по аналогии с терминологией, принятой при определении частотных свойств оптической системы, будем называть передаточной функцией. При этом считают, что  $\tau_p$  не зависит от спектрального состава электромагнитного излучения.

Модуль передаточной функции (МПФ) ДИ (амплитудная частотная характеристика) показывает зависимость его интегральной вольтовой чувствительности от частоты при синусоидальном законе модуляции облучающего потока. Обычно МПФ выражается в относительных единицах, в этом слу-

чае его можно назвать модулем нормированной передаточной функции  $|\bar{S}_\tau(\gamma_p)|$ :

$$|\bar{S}_\tau(\gamma_p)| = S_u(\gamma_p)/S_{uo},$$

где  $S_u(\gamma_p)$  и  $S_{uo}$  — значения интегральной вольтовой чувствительности на частотах модуляции  $\gamma_t$  и  $\gamma_t \rightarrow 0$  соответственно.

Здесь, как и при определении  $\tau_p$  принимают, что  $|\bar{S}_\tau(\gamma_p)|$  не зависит от спектрального состава падающего на ДИ потока электромагнитного излучения.

При анализе частотных свойств ДИ его рассматривают как апериодическое звено с постоянной времени  $\tau_p$ , тогда

$$|\bar{S}_\tau(\gamma_p)| = 1/\sqrt{1 + (2\pi\gamma_t\tau_p)^2};$$

$$\bar{S}_\tau(\gamma_p) = |\bar{S}_\tau(\gamma_p)|\exp[j\varphi(\gamma_p)] = 1/(1 + j2\pi\gamma_t\tau_p),$$

где  $\varphi(\gamma_p) = -\text{arctg}(2\pi\gamma_t\tau_p)$  — частотно-фазовая характеристика ДИ.

Шумы ДИ обычно разделяют на внутренние, зависящие от собственных свойств приемника, и внешние, возникающие от флуктуации электромагнитного излучения объектов и фона, а также от электромагнитного излучения элементов конструкции ОЭП, попадающих в его поле зрения. Внутренние шумы характеризуют или спектральной плотностью  $R_p(\gamma_p)$ , или средним квадратическим

значением их амплитуды  $\sigma_p = \sqrt{\bar{u}_{wp}^2}$ . Спектральная плотность шума и его среднее квадратическое значение связаны известным соотношением

$$\sqrt{\bar{u}_{wp}^2} = \left[ \int_{\Delta\gamma_i} \bar{K}_p(\gamma_p) d\gamma_t \right]^{1/2}.$$

Таким образом, модель состоит из следующих элементов:

- спектрального фильтра, задаваемого зависимостью  $S_\lambda^{om}$ ;
- преобразовательного безынерционного звена, характеризуемого зависимостью  $S_\lambda^{\max}(\Phi_\lambda^{fon})$ ;
- временного фильтра в виде апериодического звена, описываемого зависимостью  $\bar{S}_\tau(\gamma_p) = 1/(1 + j2\pi\gamma_t\tau_p)$ ;
- генератора шума со спектральной плотностью шума  $K_p(\gamma_p)$ .

При линеаризации зависимости  $S_\lambda^{\max}(\Phi_\lambda^{fon})$  модель ДИ становится линейной. Сигнал на выходе ДИ представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала и шума.

Модель строится на основе спектральной передаточной функции ДИ

$$S_\lambda = S_\lambda^{om} S_\lambda^{\max}.$$

## 7. Математическая модель звеньев тракта КПС при преобразовании случайных сигналов

На входе линейной инвариантной системы (рис. 11) задан сигнал в виде однородной случайной функции

$$S_{in}^{rd}(x, y) = \overset{\circ}{S}_{in}^{rd}(x, y) + m_s^{in},$$

которая характеризуется корреляционной функцией  $Kr_s^{in}(\xi, \eta)$  или спектральной плотностью  $\tilde{K}r_s^{in}(v_x, v_y)$ .

Сигнал на выходе линейной системы также будет случайным, т. е. будет описываться случайной функцией

$$S_{out}^{rd}(x', y') = \overset{\circ}{S}_{out}^{rd}(x', y') + m_s^{out}.$$

Все описанное выше справедливо и для однородной системы.

**Рассмотрим модель преобразования в общем случае.** Используя частотный метод расчета, найдем связь между спектральной плотностью случайного сигнала на входе и выходе линейной инвариантной системы. В этом случае спектральные плотности случайного процесса на выходе и входе связаны соотношением

$$\begin{aligned} \tilde{K}r_s^{out}(v_x, v_y) &= F\{Kr_s^{out}(\xi, \eta)\} = \\ &= \iiint_{-\infty}^{\infty} \iiint H(u_1, v_1)H(u_2, v_2) \times Kr_s^{in}[\xi + (u_1 - u_2), \eta + \\ &+ (v_1 - v_2)] \exp[-i2\pi(v_x\xi + v_y\eta)] du_1 du_2 dv_1 dv_2 d\xi d\eta. \end{aligned}$$

Вводя новые переменные  $\xi = \gamma - u_1 + u_2$  и  $\theta = \eta + v_1 - v_2$ , получим

$$\begin{aligned} \tilde{K}r_s^{out}(v_x, v_y) &= \iint_{-\infty}^{\infty} Kr_s^{in}(\gamma, \theta) \exp[-i2\pi(v_x\gamma + v_y\theta)] d\gamma d\theta \times \\ &\times \iint_{-\infty}^{\infty} H(u_1, v_1) \exp[i2\pi(v_x u_1 + v_y v_1)] du_1 dv_1 \times \\ &\times \iint_{-\infty}^{\infty} H(u_2, v_2) \exp[i2\pi(v_x u_2 + v_y v_2)] du_2 dv_2 \end{aligned}$$

или

$$\tilde{K}r_s^{out}(v_x, v_y) = \tilde{K}r_s^{in}(v_x, v_y) \tilde{H}(-v_x, -v_y) \tilde{H}(v_x, v_y).$$

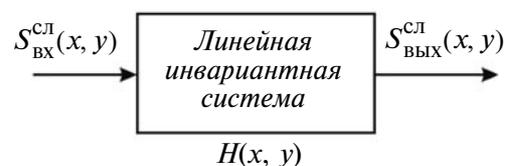


Рис. 11. Линейная система

Если  $H(x, y)$  — действительная функция (например, импульсный отклик оптической системы в КПС с ОЭС или линзы Люнеберга в КПС с РЭС), то

$$\tilde{H}(-v_x, -v_y) = \tilde{H}^*(v_x, v_y)$$

и

$$\tilde{K}r_s^{out}(v_x, v_y) = \tilde{K}r_s^{in}(v_x, v_y) |\tilde{H}(v_x, v_y)|^2.$$

Для дисперсии имеем

$$D_s^{out} = \tilde{K}r_s^{out}(0, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{K}r_s^{in}(v_x, v_y) |\tilde{H}(v_x, v_y)|^2 dv_x dv_y.$$

### Заключение

Проведенный анализ с использованием системного подхода позволил построить модель, дающую возможность определять влияние воздействия фонов, активных помех и внутренних шумов на функционирование информационной подсистемы комплекса технических средств управления ЛА.

### Список литературы

1. Легов А. М. Динамика полета и управления. М.: Наука, 1969. 360 с.
2. Михалев И. А., Окоемов Б. Н., Чичулаев М. С. Системы автоматического управления самолетами. М.: Машиностроение, 1987. 240 с.
3. Гуськов Ю. П., Загайнов Г. И. Управление полетом самолетов. М.: Машиностроение, 1980. 213 с.
4. Чинаев П. И. Теория автоматического управления. Киев: Изд-во КВИАВУ ВВС, 1967. 498 с.
5. Аэродинамика и динамика полета маневренных самолетов / Под ред. М. И. Ништа. М.: Изд-во ВВИА им проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 837 с.
6. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: МАКВИС, 1988. 828 с.
7. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б. Преобразование сигналов в оптико-электронных приборах систем управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 182 с.
8. Автоматизация проектирования оптико-электронных приборов: учеб. пособие для оптических специальностей вузов / Л. П. Лазарев, В. Я. Колочкин, А. Н. Метелкин и др. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
9. Чичварин Н. В. Экспертные компоненты САПР. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
10. Волосатова Т. М., Пашенко О. Б., Филиппов М. В. Метод построения эвристических алгоритмов в системе автоматизированного проектирования компоновки радиоэлектронного оборудования на борту маневренного самолета // Информационные технологии. 2005. № 3. С. 6—9.

## Информация

Официальная поддержка:



Правительство Челябинской области



Министерство информационных технологий и связи Челябинской области



Главное управление Министерства внутренних дел России по Челябинской области



Администрация г. Челябинска



Южно-Уральская торгово-промышленная палата

1 Первое  
Выставочное  
Объединение  
pvo74.ru

20-22 ноября ЧЕЛЯБИНСК

Генеральный информационный партнер:

БЕЗОПАСНОСТЬ



II СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

**IT-ТЕХНОЛОГИИ. СВЯЗЬ.  
ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ**

### РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- Телекоммуникации, системы телерадиовещания
- Мобильные технологии
- Кабельные и спутниковые технологии
- Автоматизированные системы связи
- Широкополосные сети связи
- Информационная безопасность
- Сетевая безопасность
- Видеоконференции
- Системы интеграции
- Программное обеспечение, биллинговые системы
- Компьютерные и информационные технологии
- Мониторы и телевизоры, оргтехника
- Телефонные аппараты и аксессуары
- Банковские технологии, оборудование и услуги
- Кабели, антенны, мачты
- Услуги операторов сотовой связи

ВЦ "Мегаполис", Свердловский пр., 51А

Тел.: (351) 215-88-77, 231-37-41 www.pvo74.ru

Д. М. Жук, канд. техн. наук, доц.,  
Московский государственный  
технический университет им. Н. Э. Баумана,  
e-mail: zhuk@bmstu.ru,

С. А. Перфильев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Центральный научно-исследовательский институт  
стоматологии и челюстно-лицевой хирургии  
Минздравсоцразвития РФ, г. Москва

## Системы автоматизированного проектирования в хирургии — CAS-системы

*Рассматривается новый подход к созданию современных CAS-систем (computer aided surgery), предназначенных для автоматизации проектирования (планирования) и сопровождения операционного лечения в челюстно-лицевой хирургии. Предлагается рассматривать процесс реабилитации пациента как последовательный и непрерывный процесс, направленный на полное решение всех проблем реабилитации пациента при минимизации отрицательных последствий и инвазивности для пациента. Приведена новая структура процесса реабилитации с широким использованием возможностей CAS-систем при детальном рассмотрении всех шагов хирургического процесса. Согласно предложенной структуре процесс хирургического лечения опирается на набор 3D-геометрических и математических моделей требуемых анатомических областей пациента. Эти модели необходимы как для создания новых методов моделирования сложных процессов в анатомических структурах человеческого тела во временной области, так и для синтеза технологического медицинского процесса реабилитации пациента.*

**Ключевые слова:** CAS-системы, биомедицинская визуализация, медицинская диагностика, челюстно-лицевая патология, планирование хирургических операций, хирургия, моделирование биологических объектов

### Введение

Поскольку при проектировании современных медицинских технологических процессов в хирургии возникает достаточно много технических, а не медицинских проблем, для решения таких задач следует выбрать наиболее эффективные методы и средства, адекватность и надежность которых доказана использованием в промышленности и науке. На сегодня таким эффективным и надежным инструментом, широко используемым для решения практических технических задач, являются системы автоматизированного проектирования (САПР) или CAD/CAE/CAM/PDM системы в англоязычном варианте.

В середине 70-х годов прошлого века в современной медицине произошли важные события —

на основе внедрения в медицинскую практику методов лучевой диагностики и развития информационных технологий были предложены новые технологии в диагностике, визуализации, терапии, хирургии и в реабилитационном лечении. Основные направления внедрения информационных технологий в медицинскую практику связаны с обработкой больших объемов разнообразной медицинской информации и с управлением медицинскими учреждениями. Однако наиболее серьезные проблемы возникли при внедрении информационных технологий в практику подготовки и планирования хирургического лечения. Это связано с тем, что требования повышения возможностей хирургического лечения и его эффективности привели к резкому росту и усложнению технического оснащения хирургов, включая сложнейшие робототехнические и компьютерные системы. В результате перед хирургами встала проблема решения непривычных и достаточно сложных технических задач, возникающих при использовании всего множества современного хирургического инструментария. При этом для решения этих задач практически невозможно было непосредственно использовать хорошо отработанные и освоенные инженерные методы, так как объектом хирургического вмешательства являются различные ткани живого организма, свойства и поведение которых принципиально отличаются от свойств технических материалов и объектов.

Методы лучевой диагностики позволили врачам существенно повысить точность диагностики до и в процессе хирургической операции. Быстрое развитие методов компьютерной графики обеспечило высококачественную 3D-визуализацию анатомических структур пациента, при этом хирурги и члены хирургических бригад получили возможность точно позиционировать хирургический инструмент в анатомическом поле и наблюдать его визуальное отображение. В результате оказалось возможным последовательно и непрерывно наращивать сложность и точность хирургических операций, сокращать время хирургического вмешательства и повышать его эффективность.

Возможности достаточно точных 3D-моделей и методов визуализации прижизненной анатомии пациента и патологических процессов позволили разработать ряд методик и программных средств по предоперационному и интраоперационному планированию хирургического вмешательства [1] и обеспечить поддержку принятия решений при подготовке хирургических операций (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Однако обычно эти методики предназначены для решения частных задач конкретного типа операций и не пригодны для оценки процесса полной реабилитации пациента и всех его функциональных систем до и после операции. В то же время, ис-

ходя из возможностей современных информационных технологий, существующих методов диагностики и постоянно повышающихся требований к качеству результатов лечения, в том числе хирургического, очевидно требование системного подхода к информационно-диагностическому сопровождению пациентов на всех стадиях их лечения.

## 1. CAS-технологии

Таким образом, задачу автоматизированного сопровождения работы хирурга во многих случаях можно рассматривать как техническую задачу и использовать для ее решения эффективные и проверенные методы и технологии компьютерной графики и CAD/CAE/CAM систем. САПР, появившись в начале 70-х годов прошлого века, прошли достаточно большой путь развития и доказали свою эффективность при решении широкого круга задач проектирования сложных технических объектов и процессов в различных отраслях промышленности и областях деятельности человека. За прошедшие годы САПР получили распространение и используются практически во всех отраслях промышленности и во многих других областях инженерной деятельности, таких как архитектура и строительство, картография, землеустройство, городская инфраструктура, дорожное строительство и т. д. Кроме того, большое число математических методов, моделей и алгоритмов, разработанных для САПР (например, геометрическое 3D-моделирование), широко используют в различных областях, даже в кинематографии, рекламе, компьютерных играх и т. п. Поэтому при выборе математических, программных и аппаратных средств для решения задач проектирования хирургического медицинского технологического процесса (МТП) необходимо рассмотреть возникающие при этом технические задачи, и сформулировать требования к методам, моделям и алгоритмам САПР, на основе которых можно будет выбрать средства САПР, позволяющие в той или иной степени решать требуемые задачи.

В настоящее время такой подход в основном реализуется с помощью специальных технологий подготовки хирургического вмешательства, включая диагностику, а также предоперационное планирование и интраоперационное сопровождение. Первоначально они назывались *Image Guided Surgery*-технологиями, а затем *Computer Aided* или *Assisted Surgery* — CAS-технологиями. Работы над этими технологиями в странах Запада были начаты в середине 90-х годов прошлого века и в настоящее время эти методы достаточно широко используют в западной медицине [2]. CAS-технологии также менее инвазивны, чем традиционная хирургия, потому что хирурги могут быть более точными, используя современные технологии и робототехнический инструмент вместо традиционного ручного хирургического инструмента (или в дополнение

к нему) в процессе операции. Это позволяет повысить уровень безопасности пациента и снизить риск послеоперационных осложнений.

Подготовка оперативного вмешательства с использованием CAS-технологий проводится хирургами совместно с высококвалифицированными техническими специалистами, использующими различные прикладные программные системы CAD/CAM и компьютерной графики, не предназначенные для решения задач подготовки хирургического вмешательства. Традиционно комплект таких программ состоит из программы (AMIRA [3], Mimics [4] и т. п.), обеспечивающей обработку данных лучевой диагностики, как правило, представленных в формате DICOM [5], мощного 3D-графического редактора (Autodesk, 3DStudio Max [6] и т. п.) и других программных систем. Для повышения эффективности работы хирургов при планировании и проведении операций в Центральном научно-исследовательском институте стоматологии и челюстно-лицевой хирургии (ЦНИИС и ЧЛХ) и Российском научном центре хирургии (РНЦХ) на основе 3D-моделей анатомических элементов и технологической оснастки, созданных с использованием перечисленных программ, методом стереолитографии изготавливают их пластиковые модели [7].

## 2. CAS-системы

Для автоматизированной поддержки процессов реализации CAS-технологий разрабатываются специальные программные комплексы, называемые CAS-системами. Удачным примером таких систем является программа SimPlant фирмы *Materialise* [8], ориентированная на решение проблем хирургии в стоматологии. Традиционно CAS-системы предназначены для повышения эффективности работы хирурга и минимизации хирургического вмешательства [9, 10]. Это достигается путем решения следующих задач:

- 3D-визуализации и построения 3D-геометрической модели по данным лучевой диагностики;
- представления анатомических объектов с заданной точностью, интеграции этапов хирургического вмешательства;
- предоперационного планирования и интраоперационного сопровождения.

При этом процесс хирургического лечения в настоящее время состоит из следующих этапов:

- 1) исследование пациента — клинические анализы и начальная диагностика;
- 2) уточненная диагностика на базе методов лучевой диагностики;
- 3) визуализация патологии и создание 3D-моделей анатомических элементов пациента;
- 4) планирование оперативного вмешательства, изготовление инструмента и оснастки для выполнения операции;

5) выполнение операции, интраоперационное сопровождение и фиксация хода операции;

6) оценка результатов хирургического вмешательства и принятие решения о дальнейших действиях по реабилитации пациента.

CAS-системы обычно используют для решения задач со 2-го до 5-го этапа и специализируются в соответствии с разделами хирургии: челюстно-лицевая, нейрохирургия, хирургия конечностей и т. п. [2]. Такая специализация обусловлена существенными различиями в анатомии и физиологии соответствующих органов человеческого тела.

В отечественной практике CAS-системы не получили распространения вследствие недостаточного использования современных информационных технологий в медицине, а также поскольку они не адаптированы к отечественным условиям, имеют высокую стоимость и сложны в освоении. В связи с этим подобные операции в нашей стране выполняют только в некоторых клиниках [7], где есть технические специалисты (часто без медицинского образования), способные вместе с хирургами вручную, используя программные средства CAD/CAM и компьютерной графики, решать задачи 3-го, 4-го и 5-го этапов, связанные с созданием 3D-моделей анатомических элементов пациента, планированием хирургического вмешательства, проектированием имплантатов и т. п.

### 3. Новая структура медицинского технологического процесса хирургического вмешательства

В работе, выполняемой совместно специалистами кафедры САПР МГТУ им. Н. Э. Баумана, ЦНИИС и ЧЛХ и РНЦХ, предлагается начать создание отечественной CAS-системы, предназначенной для хирургов челюстно-лицевой хирургии, а также расширить рамки использования CAS-систем и включить ряд новых этапов, функционально обеспечиваемых и поддерживаемых CAS-системами. Соответственно, расширяется круг задач, решаемых с использованием CAS-систем, и само понятие — CAS-системы как средства автоматизации работы медицинских специалистов, в первую очередь хи-

рургов, в процессе полной реабилитации пациента. Предлагается рассматривать процесс лечения пациента как единый и непрерывный процесс, направленный на полное излечение пациента при минимизации всех отрицательных последствий и ущерба для пациента. Для решения этой задачи необходима интеграция всех этапов реабилитации пациента с учетом их взаимного влияния и прогнозных оценок последствий при принятии решений как по отдельным этапам, так и по всему процессу реабилитации.

С учетом изложенных положений и на основе анализа существующих CAS-технологий, современных технологий CAD/CAE/CAM, компьютерной графики и технических средств и перспектив их развития предлагается новая структура медицинского технологического процесса (МТП) хирургического лечения пациента, который должен включать следующие этапы:

1) исследование пациента — клинические анализы и начальная диагностика;

2) уточненная диагностика на базе **диагностической мультимодальной модели** пациента, объединяющей результаты различных методов лучевой и функциональной диагностики;

3) мультимодальная комплексная визуализация патологии и синтез облика пациента с излеченной патологией (рис. 2, см. третью сторону обложки) как **послеоперационной 3D-модели** пациента [11];

4) принятие решения о необходимости хирургического или других методов лечения;

5) создание **гибридных, мультимодальных (проектных) 3D-моделей** необходимых анатомических элементов пациента с требуемой точностью, сопоставление актуальной модели пациента с послеоперационной моделью;

6) оценка патологии, выбор концептуальных вариантов реализации оперативного вмешательства и числа этапных оперативных вмешательств;

7) выбор варианта выполнения операции на основе моделирования хода операции (на базе **расчетной модели** пациента), определение технологической структуры выбранного варианта;

8) планирование (конструкторское проектирование) оперативного вмешательства с учетом рабочих

зон инструмента и доступности операционных зон для хирурга [12], проектирование инструмента и оснастки для выполнения операции (рис. 3); выбор интраоперационной навигационной системы и оценка необходимости и возможностей использования специальных средств (хирургических роботов, манипуляторов, лапароскопии, эндоскопии и т. п.);

9) прогнозирование результатов послеоперационного выздо-

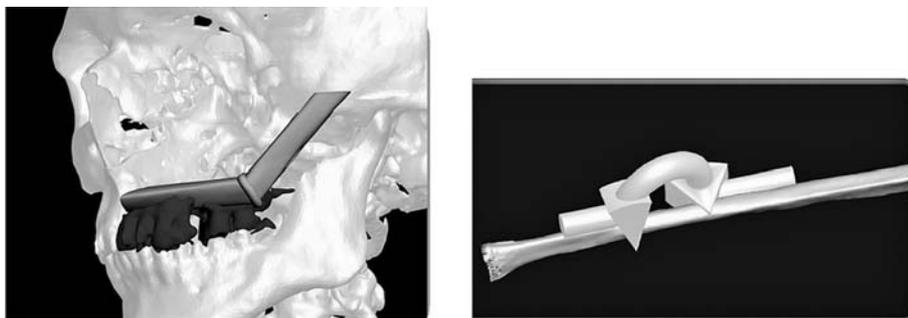


Рис. 3. Проектирование технологической оснастки (интраоперационного шаблона) для выполнения операции

рождения пациента для предлагаемого варианта оперативного вмешательства (на базе расчетной модели пациента) с возможностью возврата на этап 7 при отрицательной оценке данного варианта;

10) технологическое проектирование оперативного вмешательства как медицинского технологического процесса с подготовкой общего плана операции и операционных карт для каждого члена хирургической бригады, изготовление инструмента и оснастки для выполнения операции;

11) тренировка хирургической бригады в условиях дополненной (*augmented*) реальности;

12) выполнение операции, интраоперационное сопровождение хода операции с возможностью оперативного изменения плана операции и используемого инструментария, фиксация хода операции (рис. 4, см. третью сторону обложки);

13) мониторинг состояния пациента с использованием *диагностической унимодальной модели* пациента, при удовлетворительном состоянии — возврат к этапу 5 при наличии невыполненных этапных оперативных вмешательств;

14) оценка результатов хирургического вмешательства, сопоставление их с результатами прогнозирования (этап 9) и принятие решения о дальнейших действиях по реабилитации пациента.

Более подробно содержание этапов реабилитационного лечения пациента, используемых методов и моделей и других особенностей предлагаемого варианта МТП будет рассмотрено в последующих статьях по этой тематике.

#### 4. Требования к перспективной CAS-системе

В соответствии с предложенной структурой процесса хирургического лечения можно сформулировать требования к задачам, решаемым разрабатываемой CAS-системой:

- создание необходимых геометрических 3D-моделей требуемых анатомических областей пациента с заданной точностью и на их основе *мультимодальной диагностической модели* по данным лучевой и функциональной диагностики;
- визуализация различных 3D-моделей анатомических областей пациента;
- создание гибридных мультимодальных (*проектных*) 3D-моделей необходимых анатомических элементов пациента с заданной точностью;
- синтез эталонного послеоперационного облика пациента и соответствующих *послеоперационных 3D-моделей*;
- создание гибридных мультимодальных (*расчетных*) 3D-моделей необходимых анатомических элементов пациента с заданной точностью для моделирования процесса оперативного вмешательства и послеоперационных изменений в процессе выздоровления пациента;

- формальное описание оперативного вмешательства, создание библиотеки описаний типовых хирургических операций;
- синтез технологической оснастки оперативного вмешательства для устранения патологии;
- моделирование процесса выбранного варианта оперативного вмешательства с учетом рабочих зон инструмента и доступности операционных зон для хирурга при принятии решения по выбору варианта операции;
- проектирование инструмента и оснастки для выполнения операции;
- прогнозирование последствий оперативного вмешательства;
- технологическое проектирование оперативного вмешательства;
- интраоперационное сопровождение хода операции с возможностью оперативного изменения плана операции и используемого инструментария.

Для решения перечисленных задач необходимо проведение ряда исследовательских работ для разработки соответствующих методов и моделей. Необходимо также сформулировать спецификацию к новому поколению CAS-систем, разработать их теоретическую и алгоритмическую базу и сами системы.

#### Список литературы

1. **Bartz D., Kindlmann G., Mueller K., Preim B., Wacker M.** IEEE Visualization 2005. Tutorial 2. Visual Medicine: Foundations and Advanced Applications of Medical Imaging. Full-Day Tutorial. — University of Tübingen, Brigham and Women's Hospital, Stony Brook University, University of Magdeburg, University of Applied Sciences Dresden, 2005.
2. **Computer Assisted Surgery.** Precision Technology for Improved Patient Care, March 22, 2004. URL: <http://www.advmed.org/newsroom/caswhitepaper.pdf>
3. **Программа AMIRA** фирмы Visage Imaging: документация. URL: <http://www.amira.com/documentation.html>
4. **Программа Mimics** фирмы Materialise. URL: <http://www.materialise.com/mimics>
5. **Стандарт** формата DICOM. URL: <http://medical.nema.org/dicom/geninfo/Strategy.pdf>
6. **Программа 3ds Max** фирмы Autodesk. URL: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?siteID=123112&id=13567426>
7. **Бунан С. Б., Хохлачев С. Б., Перфильев С. А., Йигиталиев Ш. Н.** Хирургическое лечение больных с дефектами и деформациями скуло-глазничной области с применением трехмерного компьютерного моделирования при планировании оперативного вмешательства // Институт стоматологии. Июнь 2010. № 47.
8. **Программа SimPlant** фирмы Materialise. URL: <http://www.materialise.com/materialise/view/en/2970306-SimPlant.html>
9. **Computer Aided Surgery.** Official Journal of ISCAS.
10. **Computer Assisted Surgery.** Precision Technology for Improved Patient Care. — March 2004, 2005 by the Advanced Medical Technology Association.
11. **Демина А. И.** Разработка общей схемы синтеза предпроектной антропометрической 3D-модели пациента для челюстно-лицевой хирургии // Электронное научно-техническое издание "Наука и образование". 2010. № 10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/138654.html>
12. **Давыденко Е. А., Жук Д. М.** Особенности задач проектирования хирургических операций в челюстно-лицевой хирургии // Электронное научно-техническое издание "Наука и образование". 2010. № 3. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/138654.html>

УДК 519.715

**В. И. Левин**, д-р техн. наук, проф.,  
e-mail: vilevin@mail.ru,  
Пензенская государственная  
технологическая академия

## Логико-автоматная теория множеств

*Предложен автоматически-логический подход к построению прикладной количественной теории множеств. В ней конечный динамический автомат служит адекватной математической моделью операций над множествами, а непрерывная логика — адекватным математическим аппаратом для вычисления результата этих операций.*

**Ключевые слова:** теория множеств, непрерывная логика, логико-автоматная модель, конечный динамический автомат

### Введение

Хорошо известно, что традиционная теория множеств является фундаментом всей математики [1]. Эта теория позволяет решать целый ряд задач, в основном качественных, связанных с получением различных характеристик изучаемых множеств, например: установление существования или же несуществования формально определяемого множества; установление типа того или иного множества (конечное, счетное, континуум); нахождение в конкретных частных случаях размера (мощности) множества, полученного в результате операций над другими множествами по заданным размерам последних и т. д. Но в настоящее время человеческая деятельность распространяется на целый ряд областей, которые непосредственно связаны не с теми или иными математическими дисциплинами, опирающимися на теорию множеств (анализ, алгебра, геометрия и т. д.), а с преобразованиями собственно множеств. Этими областями являются распознавание образов, определение взаимопорядоченности объектов и событий, поиск в информационных массивах, проектирование вычислительных процессов и др. [2—6]. Для работы в этих областях нужна другая — прикладная количественная и конструктивная теория множеств, позволяющая не только определять те или иные множества, но и эффективно вычислять как различные количественные

характеристики множеств, полученных в результате операций над заданными множествами, так и сами результирующие множества. Такой теории сегодня, по-видимому, нет.

Возможны различные подходы к построению прикладной количественной и конструктивной теории множеств. В статье предлагается автоматически-логический подход к построению этой теории. При этом конечный динамический автомат оказывается адекватной математической моделью различных операций над множествами, а алгебра непрерывной логики — адекватным математическим аппаратом для эффективного вычисления множества — результата этих операций.

### 1. Постановка задачи

Математическая постановка решаемой проблемы может быть описана так. Задана совокупность  $n$  непрерывных множеств  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , имеющих вид последовательностей непересекающихся отрезков:

$$\begin{aligned} A_1 &= \{[a_{11}, b_{11}], [a_{12}, b_{12}], \dots, [a_{1m_1}, b_{1m_1}]\}; \\ A_2 &= \{[a_{21}, b_{21}], [a_{22}, b_{22}], \dots, [a_{2m_2}, b_{2m_2}]\}; \\ \dots & \\ A_n &= \{[a_{n1}, b_{n1}], [a_{n2}, b_{n2}], \dots, [a_{nm_n}, b_{nm_n}]\}, \end{aligned} \quad (1)$$

который, очевидно, не ограничивает общности задания и изучения непрерывных множеств. Рассмотрим заданную суперпозицию  $\mathbf{F}$  обычных теоретико-множественных операций  $\cup$  (объединение),  $\cap$  (пересечение),  $\bar{\phantom{x}}$  (дополнение), совершаемых над некоторой совокупностью  $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$  множеств  $A_1, A_2, \dots, A_n$ . Очевидно, что любая из операций  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  над множествами  $A_1, A_2, \dots, A_n$  дает множество того же вида последовательности непересекающихся отрезков, что и каждое множество  $A_1, \dots, A_n$ , т. е. вида (1). Отсюда следует, что и заданная суперпозиция  $\mathbf{F}(A_1, A_2, \dots, A_n)$  операций  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  над заданной совокупностью множеств  $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$  имеет своим результатом множество  $B$  того же вида (1), т. е.

$$\begin{aligned} B &\equiv \mathbf{F}(A_1, A_2, \dots, A_n) = \\ &= \{[c_1, d_1], [c_2, d_2], \dots, [c_N, d_N]\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Проблема в том, чтобы ответить на четыре вопроса:

1. Можно ли выразить результирующее множество  $B$  через исходные  $A_1, A_2, \dots, A_n$  в аналитической

форме, т. е. выразить числовые параметры  $c_k, d_k, k = \overline{1, N}$ , множества  $B$  (2) в виде некоторых соответствующих функций  $f_k, \varphi_k, k = \overline{1, N}$ , от числовых параметров  $a_{ij}, b_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$ , исходных множеств  $A_1, \dots, A_n$  (1)?

2. Какова та алгебра вещественных чисел, с помощью операций которой можно выразить нужные нам функции  $f_k, \varphi_k, k = \overline{1, N}$ ?

3. Существует ли алгоритм построения нужных нам зависимостей  $c_k, d_k, k = \overline{1, N}$ , от  $a_{ij}, b_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$ :

$$\begin{aligned} c_k &= f_k(a_{ij}, b_{ij}), d_k = \varphi_k(a_{ij}, b_{ij}), \\ k &= \overline{1, N}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i} \end{aligned} \quad (3)$$

4. Каков этот алгоритм?

Ни одна из четырех сформулированных выше задач до сих пор не рассматривалась в литературе. Мы дадим ниже их решение, основанное на моделировании преобразования  $\mathbf{F}$  множеств  $A_1, \dots, A_n$  в множество  $B$  эквивалентной операцией преобразования соответствующих множеств  $A_1, \dots, A_n$  временных процессов  $A_1(t), \dots, A_n(t)$  в соответствующий множеству  $B$  временной процесс  $B(t)$  в некотором конечном динамическом автомате-модели. При этом поставленные задачи сводятся к соответствующим задачам теории конечных динамических автоматов, которые решаются с помощью разработанных в этой теории методов и математического аппарата [7–9].

## 2. Математическая модель преобразования множеств

Для решения сформулированной в п. 1 проблемы построим математическую модель преобразования совокупности множеств  $A = (A_1, \dots, A_n)$  в множество  $B$  согласно формуле (2). Представим теоретико-множественное преобразование (2) в виде блок-схемы (рис. 1).

Напомним (см. п. 1), что  $\mathbf{F}$  — это некоторая суперпозиция теоретико-множественных операций  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$ . Блок-схема рис. 1 в соответствии с этим представима как схема из элементов трех типов (рис. 2), реализующих операции  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  и соеди-

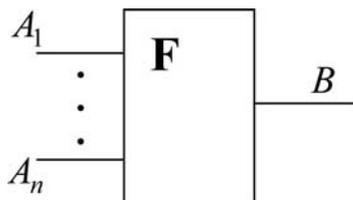


Рис. 1. Схема теоретико-множественного преобразования  $\mathbf{F}$

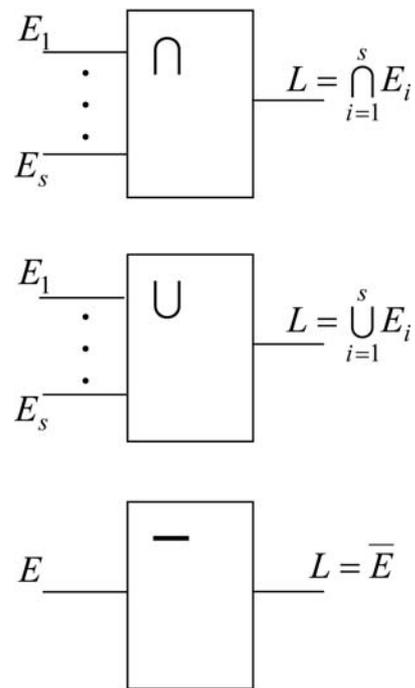


Рис. 2. Элементы для реализации операций алгебры множеств

ненных в соответствии с заданной суперпозицией  $\mathbf{F}$  этих операций. К сожалению, определения операций  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  неконструктивны и поэтому вычислить эффективно результат суперпозиции  $\mathbf{F}$  этих операций непосредственно по их определениям невозможно. Мы пойдем другим путем: заменим теоретико-множественные операции  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  другими по смыслу, но математически эквивалентными операциями, результат суперпозиции которых эффективно вычислим.

Как известно, любые множества и операции над ними можно адекватно описывать не только напрямую — с помощью соответствующих определений, но и косвенно — с помощью так называемых функций принадлежности. Функция принадлежности (в математической литературе — характеристическая функция)  $M_A(x)$  любого детерминированного множества  $A$  вводится следующим образом [10]:

$$M_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A, \\ 0, & x \notin A. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, функция принадлежности множества  $M_A(x)$  является некоторой двоичной функцией с областью определения  $A$  и областью значений  $\{0, 1\}$ . Между множеством и его функцией принадлежности существует взаимно однозначное соответствие, так что вместо работы с множествами можно работать с их функциями принадлежности, что в определенных случаях может оказаться более предпочтительным.

В частности, теоретико-множественные операции  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  можно выполнять не на основании их исходного, общеизвестного определения (по кото-

рому объединение множеств  $\bigcup_{i=1}^n A_i$  содержит все элементы, входящие хотя бы в одно из множеств  $A_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , пересечение множеств  $\bigcap_{i=1}^n A_i$  содержит только элементы, входящие во все множества  $A_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а дополнение множества  $\bar{A}$  содержит только те элементы, которые не входят в множество  $A$ , а в терминах функций принадлежности по приведенным ниже формулам:

$$M_{\bigcup_{i=1}^n A_i}(x) = \begin{cases} 1, M_{A_1}(x) = 1 \text{ или } M_{A_2}(x) = 1 \dots \\ \text{или } M_{A_n}(x) = 1; \\ 0, M_{A_1}(x) = M_{A_2}(x) = \dots = \\ = M_{A_n}(x) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$M_{\bigcap_{i=1}^n A_i}(x) = \begin{cases} 1, M_{A_1}(x) = M_{A_2}(x) = \\ = \dots = M_{A_n}(x) = 1; \\ 0, M_{A_1}(x) = 0 \text{ или } M_{A_2}(x) = 0 \dots \\ \text{или } M_{A_n}(x) = 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} 1, M_A(x) = 0; \\ 0, M_A(x) = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Преимущество выполнения теоретико-множественных операций в терминах функции принадлежности заключается в том, что формулы для выполнения операций (5)–(7) можно записать на языке булевой алгебры:

$$M_{\bigcup_{i=1}^n A_i}(x) = \bigvee_{i=1}^n M_{A_i}(x); \quad (8)$$

$$M_{\bigcap_{i=1}^n A_i}(x) = \bigwedge_{i=1}^n M_{A_i}(x); \quad (9)$$

$$M_{\bar{A}}(x) = \overline{M_A(x)}. \quad (10)$$

В выражениях (8)–(10) символы  $\vee$ ,  $\wedge$  и  $\bar{\phantom{x}}$  означают соответственно булевы логические операции дизъюнкции, конъюнкции и отрицания. Для выполнения суперпозиции операций булевой алгебры (8)–(10) над функциями в теории конечных динамических автоматов [7–9] разработаны соответствующие эффективные методы и алгоритмы. Этим воспользуемся ниже.

Заменим в схеме рис. 1 из элементов с операциями  $\cup$ ,  $\cap$ ,  $\bar{\phantom{x}}$  (рис. 2), соответствующей нашему теоретико-множественному преобразованию  $\mathbf{F}$ , входные

$A_1, A_2, \dots, A_n$  и выходное  $B$  его множества их функциями принадлежности  $M_{A_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и  $M_B(x)$ , а элементы  $\cup$ ,  $\cap$ ,  $\bar{\phantom{x}}$  — соответственно логическими элементами  $\vee$ ,  $\wedge$ ,  $\bar{\phantom{x}}$ , которые вычисляются согласно формулам (8)–(10) операции  $\bigcup A_i$ ,  $\bigcap A_i$ ,  $\bar{A}_i$  в терминах функции принадлежности множеств  $A_i$ .

В результате имеем схему из элементов с логическими операциями  $\vee$ ,  $\wedge$ ,  $\bar{\phantom{x}}$ , осуществляющую теоретико-множественное преобразование  $\mathbf{F}$  (2) входных множеств  $A_1, A_2, \dots, A_n$  в выходное множество  $B$  в терминах функций принадлежности  $M$  этих множеств. Эту форму преобразования обозначим  $\mathbf{F}_M$ , так что (2) запишется в виде

$$M_B(x) \equiv \mathbf{F}_M[M_{A_1}(x), M_{A_2}(x), \dots, M_{A_n}(x)] = M\{[c_1, d_1], [c_2, d_2], \dots, [c_N, d_N]\}. \quad (11)$$

Полученная логическая схема представлена на рис. 3, а образующие ее логические элементы — на рис. 4. Эти элементы соединены в схеме в соответствии с требуемой суперпозицией  $\mathbf{F}_M$  элементарных логических операций  $\vee$ ,  $\wedge$ ,  $\bar{\phantom{x}}$ . Схема рис. 3 является математической моделью изучаемого теоретико-множественного преобразования  $\mathbf{F}$  (2): подав на ее входы функции принадлежности  $M_{A_i}(x)$  заданных

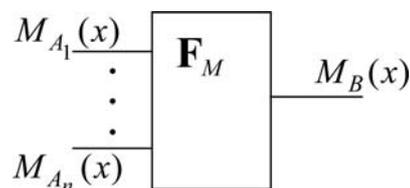


Рис. 3. Модель  $\mathbf{F}$  в терминах функций принадлежности

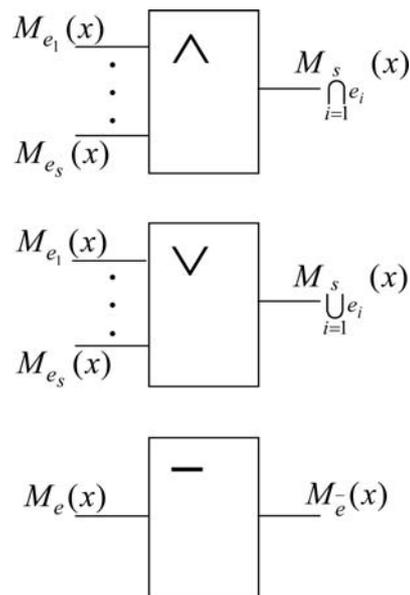


Рис. 4. Элементы для реализации операций алгебры логики

непрерывных множеств  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , получим на выходе функцию принадлежности  $M_B(x)$  множества  $B$ , являющегося результатом преобразования  $F$ .

Поскольку функции принадлежности  $M_A(x)$  есть двоичные функции переменной  $x$  и имеют значения 0 или 1, то, интерпретируя  $x$  как время, можно рассматривать  $M_A(x)$  как временные процессы со значениями 0 или 1. Таким образом, схема рис. 3 представляет собой схемную реализацию некоторого конечного динамического автомата без памяти.

Итак, адекватной математической моделью произвольного теоретико-множественного преобразования  $F$  вида (2) является конечный динамический автомат без памяти с  $n$  входами и одним выходом вида рис. 3. Входными процессами указанного автомата являются модели-функции принадлежности  $M_{A_i}(x)$  подлежащих преобразованию множеств  $A_i$ ,

$i = \overline{1, n}$ , рассматриваемые как двоичные, со значениями 0 или 1, функции непрерывного времени  $x$ , а выходным процессом автомата — модель-функция принадлежности  $M_B(x)$  получаемого в результате преобразования множества  $B$ , рассматриваемая аналогично. Построенный автомат-модель реализует на своем выходе булеву логическую функцию входов  $F_M$ , которая получается из заданной теоретико-множественной функции, осуществляющей преобразование  $F$  вида (2), заменой операций над множествами  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  соответствующими булевыми логическими операциями  $\vee, \wedge, \bar{\phantom{x}}$  согласно (8)—(10). Логическая функция  $F_M$  является математической моделью заданной теоретико-множественной функции  $F$ .

Значение построенной динамико-автоматной математической модели произвольного теоретико-множественного преобразования  $F$  вида (2) состоит в том, что в теории конечных динамических автоматов [7—9] имеются эффективные математический аппарат и основанные на нем методы и алгоритмы, позволяющие по входным временным процессам динамического автомата вычислять в аналитической форме его выходной временной процесс. Эти аппарат, методы и алгоритмы можно использовать для решения стоящей перед нами проблемы аналитического описания теоретико-множественных преобразований (п. 1).

### 3. Конечные динамические автоматы и логические методы их исследования

Конечный динамический автомат без памяти [1, 2, 4] представляет собой математическую модель в виде  $(n, 1)$ -полюсника (рис. 5), реализующего на выходе  $y$  некоторую булеву функцию входов  $x_1, \dots, x_n$ :

$$y = f(x_1, \dots, x_n), \quad x_1, \dots, x_n, y \in \{0, 1\}. \quad (12)$$

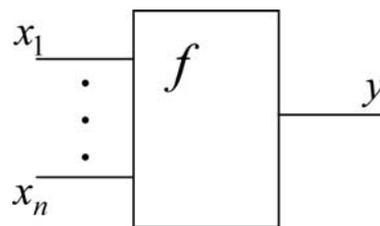


Рис. 5. Модель конечного динамического автомата без памяти

На входы автомата (рис. 5) подаются входные двоичные динамические процессы (двоичные функции непрерывного времени)

$$\begin{aligned} x_1(t) &= 1(a_{11}, b_{11})0(-, -)1(a_{12}, b_{12})\dots 1(a_{1m_1}, b_{1m_1}); \\ &\text{-----} \\ x_n(t) &= 1(a_{n1}, b_{n1})0(-, -)1(a_{n2}, b_{n2})\dots 1(a_{nm_n}, b_{nm_n}), \end{aligned} \quad (13)$$

где выражения  $1(a, b)$  обозначают интервалы единичных значений динамического процесса (импульсы), а  $0(-, -)$  — промежуточные интервалы, в которых действуют нулевые значения (паузы). На выходе автомата рис. 5 имеем двоичный динамический процесс

$$y(t) = 1(c_1, d_1)0(-, -)1(c_2, d_2)\dots 1(c_m, d_m), \quad (14)$$

соответствующий поданным входным процессам (13) автомата и его реализуемой булевой логической функции (12). Основной задачей для конечного динамического автомата без памяти является задача нахождения выходного процесса  $y(t)$  по известным входным процессам  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  и реализуемой булевой логической функции  $f$ . В 1972 г. автором было установлено, что указанная задача может быть решена в аналитической форме для любого конечного динамического автомата без памяти, имеющего любое число входов, входные процессы и реализуемую функцию, с помощью математического аппарата алгебры непрерывной логики, которая, таким образом, оказывается адекватным математическим аппаратом для исследования динамики конечных автоматов [1, 2, 4, 5]. Определяется непрерывная логика следующим образом. Введем несущее множество  $C = [A, B]$  — произвольный отрезок на оси вещественных чисел. Тогда для любых  $a, b, e \in C$  можно ввести элементарные логические операции (функции):

$$a \vee b = \max(a, b) \text{ — дизъюнкция}; \quad (15)$$

$$a \wedge b = \min(a, b) \text{ — конъюнкция}; \quad (16)$$

$$\bar{e} = A + B - e \text{ — отрицание}. \quad (17)$$

Введенные операции алгебры непрерывной логики (15)—(17) подобны соответствующим операциям двужанчной (булевой) алгебры логики, в которой несущее множество  $C = \{0, 1\}$ , и обобщают их на случай непрерывного несущего множества.

В алгебре непрерывной логики сохраняют силу некоторые законы булевой алгебры логики:

$$a \vee a = a, a \wedge a = a \text{ — тавтологии; (18)}$$

$$a \vee b = b \vee a, a \wedge b = b \wedge a \text{ — переместительный; (19)}$$

$$(a \vee b) \vee c = a \vee (b \vee c), (a \wedge b) \wedge c = a \wedge (b \wedge c) \text{ — сочетательный; (20)}$$

$$a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c), a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c) \text{ — распределительный; (21)}$$

$$\overline{\overline{a}} = a, \overline{a \wedge b} = \overline{a} \vee \overline{b}, \overline{a \vee b} = \overline{a} \wedge \overline{b} \text{ — де Моргана; (22)}$$

$$a \vee (a \wedge b) = a, a \wedge (a \vee b) = a \text{ — поглощения. (23)}$$

Кроме них, в непрерывной логике действуют некоторые важные специфические законы, например, оценки и упрощения логического выражения:

$$a \vee b \geq a, b; a \wedge b \leq a, b; (24)$$

$$a_1 \vee \dots \vee a_{i-1} \vee a_i \vee a_{i+1} \vee \dots \vee a_m = a_1 \vee \dots \vee a_{i-1} \vee a_{i+1} \vee \dots \vee a_m \text{ при } a_i \leq a_k (k \neq i); (25)$$

$$a_1 \wedge \dots \wedge a_{i-1} \wedge a_i \wedge a_{i+1} \wedge \dots \wedge a_m = a_1 \wedge \dots \wedge a_{i-1} \wedge a_{i+1} \wedge \dots \wedge a_m \text{ при } a_i \geq a_k (k \neq i). (26)$$

Идея отыскания выходного процесса конечного динамического автомата без памяти по его заданным входным процессам и реализуемой логической функции проста и изложена ниже.

Обозначим:

1 — двоичный динамический процесс, который принимает постоянное значение 1;

0 — двоичный динамический процесс, принимающий постоянное значение 0;

1' — изменение значения динамического процесса вида 0 → 1;

0' — изменение значения динамического процесса 1 → 0;

1'\_a — изменение 1' в момент a;

0'\_b — изменение 0' в момент времени b;

1'\_a 0'\_b — импульс вида 1(a, b) в интервале (a, b);

0'\_a 1'\_b — пауза вида 0(a, b) в интервале (a, b).

Любой двоичный динамический процесс можно записать в виде последовательности импульсов и пауз (как в (13)) либо последовательности изменений значения процесса. Например, процесс на рис. 6 можно записать в виде

$$x(t) = 1(-\infty, a)0(-, -)1(b, e)0(-, \infty) \text{ или}$$

$$x(t) = 0'_a 1'_b 0'_e.$$

Число изменений значения двоичного динамического процесса называется его глубиной. Например, глубина процесса на рис. 6 равна 3. Для системы (вектора) двоичных динамических процессов соответствующим понятием является векторная

глубина. Например, векторная глубина системы двух процессов  $x_1(t) = 1(a, b)$ ,  $x_2(t) = 1(c, d)$  равна (2, 2). Покажем на примерах, как с помощью алгебры непрерывной логики определить выходной процесс конечного динамического автомата без памяти по его входным процессам и реализуемой логической функции. Рассмотрим сначала простейшие автоматы — двухвходовые дизъюнкты и конъюнкты, реализующие булевы логические функции дизъюнкция  $\vee$  и конъюнкция  $\wedge$ :

$$y = x_1 \vee x_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } x_1 = x_2 = 0; \\ 1 & \text{в иных случаях;} \end{cases} \quad (27)$$

$$y = x_1 \wedge x_2 = \begin{cases} 1 & \text{при } x_1 = x_2 = 1; \\ 0 & \text{в иных случаях} \end{cases}$$

и простейшие входные процессы с глубиной не выше 1. Пусть, скажем, нужно найти выходной процесс конъюнктора — реакцию на входные процессы  $x_1(t) = 1'_a$ ,  $x_2(t) = 0'_b$ . Искомый процесс равен одиночному импульсу  $1(a, b)$  или тождественному нулю в зависимости от того, что больше: b или a. Поэтому, интерпретируя тождественный 0 как одиночный импульс с совмещенными началом и концом, можем записать искомый процесс в виде

$$y(t) = x_1(t) \wedge x_2(t) = 1'_a \wedge 0'_b = \begin{cases} 1(a, b) & \text{при } b > a; \\ 0 = 1(a, a) & \text{при } b \leq a. \end{cases} \quad (28)$$

Исходя из этого с помощью операции дизъюнкции непрерывной логики  $\vee$  окончательно находим

$$1'_a \wedge 0'_b = 1(a, a \vee b). \quad (29)$$

Выходные процессы в дизъюнкторе и конъюнкторе при всех остальных входных процессах с глубиной не выше 1 получаются аналогично:

$$0 \wedge 0'_a = 0 \wedge 1'_b = 0; 1 \wedge x'_a = x'_a; 0'_a \wedge 0'_b = 0'_{a \wedge b};$$

$$1'_a \wedge 1'_b = 1'_{a \vee b}; 1'_a \wedge 0'_b = 1(a, a \vee b);$$

$$1 \vee 0'_a = 1 \vee 1'_b = 1; 0 \vee x'_a = x'_a; 0'_a \vee 0'_b = 0'_{a \vee b};$$

$$1'_a \vee 1'_b = 1'_{a \wedge b}; 1'_a \vee 0'_b = 0(b, a \vee b). \quad (30)$$

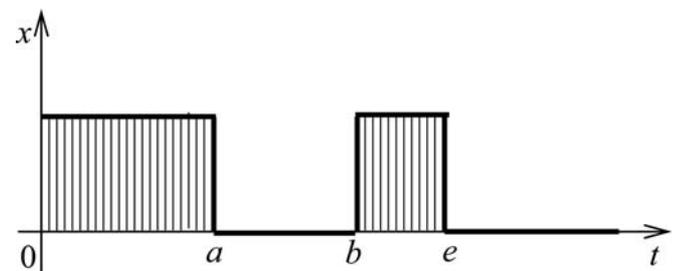


Рис. 6. Пример двоичного динамического процесса

Формулы (30) наглядно демонстрируют адекватность аппарата непрерывной логики как средства отыскания выходных процессов динамических автоматов по их входным процессам и реализуемой логической функции.

Если входные процессы дизъюнктора или конъюнктора имеют глубину свыше 1, то отыскание их выходных процессов требует применения формальных методов. Основные из них — прямой метод, метод декомпозиции и метод инверсии, а также метод последовательных подстановок.

Прямой метод основан на полном переборе всех возможных случаев взаимного расположения входных процессов элемента. Для каждого случая выходной процесс элемента записывается в явном виде отдельно. Общее выражение получается из частных с использованием непрерывной логики.

Метод декомпозиции состоит в том, что один из двух входных процессов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ , например  $x_1(t)$ , разбивается на два последовательных подпроцесса  $x_{11}(t)$  и  $x_{12}(t)$ . Затем находятся составляющие выходные процессы  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  — реакции на составляющие входные процессы  $\{x_{11}(t), x_2(t)\}$  и  $\{x_{12}(t), x_2(t)\}$ . Если  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  не пересекаются во времени участками, содержащими все изменения значения процесса, то искомым выходной процесс  $y(t)$  определяется как последовательность  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ . Метод инверсии основан на формулах

$$\begin{aligned} \overline{x_1(t) \vee x_2(t)} &= \overline{x_1(t)} \wedge \overline{x_2(t)}; \\ \overline{x_1(t) \wedge x_2(t)} &= \overline{x_1(t)} \vee \overline{x_2(t)}, \end{aligned} \quad (31)$$

вытекающих из закона де Моргана двузначной (булевой) алгебры логики и позволяющих по известной реакции дизъюнктора (конъюнктора) на входные процессы  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  определить реакцию конъюнктора (дизъюнктора) на входные процессы  $\overline{x_1(t)}$ ,  $\overline{x_2(t)}$ . Используя вышеописанные методы, нетрудно получить формулы для выходных процессов дизъюнктора и конъюнктора при различных входных процессах с глубиной (1, 2):

$$\begin{aligned} 0'_a \vee 1(b, c) &= 0(a, a \vee b)1(-, a \vee c); \\ 1'_a \vee 1(b, c) &= 1(a \wedge b, c)0(-, a \vee c); \\ 0'_a \vee 0(b, c) &= 0(a \vee b, a \vee c); \\ 1'_a \vee 0(b, c) &= 0(a \wedge b, a \wedge c); \\ 0'_a \wedge 1(b, c) &= 1(a \wedge b, a \wedge c); \\ 1'_a \wedge 1(b, c) &= 1(a \vee b, a \vee c); \\ 0'_a \wedge 0(b, c) &= 0(a \wedge b, c)1(-, a \vee c); \\ 1'_a \wedge 0(b, c) &= 1(a, a \vee b)0(-, a \vee c); \end{aligned} \quad (32)$$

входных процессах с глубиной (2, 2):

$$\begin{aligned} 1(a, b) \vee 1(c, d) &= \\ &= 1[a \wedge c, (a \wedge d) \vee (b \wedge c)]0(-, -)1(a \vee c, b \vee d); \\ 1(a, b) \wedge 1(c, d) &= 1[a \vee c, a \vee c \vee (b \wedge d)]; \\ 0(a, b) \vee 0(c, d) &= 0[(a \wedge d) \vee (b \wedge c), b \wedge d]; \\ 0(a, b) \wedge 0(c, d) &= \\ &= 0[a \wedge c, (a \wedge d) \vee (b \wedge c)]1(-, a \vee c)0(-, b \vee d); \\ 0(a, b) \vee 1(c, d) &= \\ &= 0(a \wedge c, b \wedge c)1(-, a \vee d)0(-, b \vee d); \\ 0(a, b) \wedge 1(c, d) &= \\ &= 1(a \wedge c, a \wedge d)0(-, b \vee c)1(-, b \vee d) \end{aligned} \quad (33)$$

и т. д. Аналогично находятся непрерывно-логические выражения выходных процессов многовыходных дизъюнкторов и конъюнкторов, реализующих многоместные булевы дизъюнкцию и конъюнкцию, которые являются аналогичными их двуместным прототипам (27), например

$$\begin{aligned} 0'_a \wedge 0'_b \wedge \dots \wedge 0'_d &= 0'_{a \wedge b \wedge \dots \wedge d}; \\ 1'_a \wedge 1'_b \wedge \dots \wedge 1'_d &= 1'_{a \vee b \vee \dots \vee d}; \\ 1'_a \wedge 1'_b \wedge \dots \wedge 1'_d \wedge 0'_e \wedge 0'_g \wedge \dots \wedge 0'_f &= \\ &= 1[a \vee b \vee \dots \vee d; a \vee b \vee \dots \vee d \vee (e \wedge g \wedge \dots \wedge f)]; \\ 0'_a \vee 0'_b \vee \dots \vee 0'_d &= 0'_{a \vee b \vee \dots \vee d}; \\ 1'_a \vee 1'_b \vee \dots \vee 1'_d &= 1'_{a \wedge b \wedge \dots \wedge d}; \\ 1'_a \vee 1'_b \vee \dots \vee 1'_d \vee 0'_e \vee 0'_g \vee \dots \vee 0'_f &= \\ &= 0[e \vee g \vee \dots \vee f; e \vee g \vee \dots \vee f \vee (a \wedge b \wedge \dots \wedge d)]. \end{aligned} \quad (34)$$

В общей теории конечных динамических автоматов [7–9] конструктивно доказано, что реакцию любого автомата данного типа на входные воздействия можно выразить через эти воздействия в аналитической форме с помощью операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики. Дадим теперь формальное доказательство этого положения.

**Теорема 1.** Пусть имеется произвольный конечный динамический автомат без памяти с конечным числом  $n$  входов  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и одним выходом  $y$ , реализующий некоторую булеву функцию входов  $y = f(x_1, \dots, x_n)$ . На входы автомата поступают некоторые двоичные динамические  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , с возможными значениями 0 или 1, любой конечной глубины, а с его выхода снимается соответствующий двоичный динамический процесс  $y(t)$ ;  $t$  — непрерывное время. Тогда выходной процесс автомата  $y(t)$  выражается в аналитической форме через его входные процессы  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , с помощью операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики. Или, более точно, любой момент изменения состояния выходного процесса  $y(t)$  выражается соответствующей суперпозицией этих операций над множеством моментов изменения состояний входных процессов  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

*Доказательство.* Известно [7—9], что любой конечный динамический автомат без памяти можно реализовать в виде некоторого булева логического  $(n, 1)$ -полюсника (типа рис. 5), не имеющего обратных связей и потому допускающего разбиение своей схемы на последовательные, от входов к выходу, ступени глубиной в один элемент каждая; эти элементы реализуют соответствующие элементарные булевы функции. Также известно из литературы [7—9], что любой булев логический  $(n, 1)$ -полюсник можно построить на произвольном полном наборе булевых логических элементов, реализующем соответствующий набор булевых логических функций, не меняя вырабатываемую на его выходе булеву логическую функцию входов. Построим булев логический  $(n, 1)$ -полюсник рассматриваемого конечного динамического автомата из полного набора {конъюнктор (логическая функция конъюнкции), инвертор (функция отрицание)}.

Известно [8, 9], что двоичный динамический процесс  $y^{\wedge}(t)$  на выходе конъюнктора, получающего по двум своим входам динамические процессы

$$\begin{aligned} x_1(t) &= 1(a_1, b_1)0(-, -)1(a_2, b_2)\dots 1(a_m, b_m); \\ x_2(t) &= 1(c_1, d_1)0(-, -)1(c_2, d_2)\dots 1(c_k, d_k), \end{aligned} \quad (35)$$

выражается в аналитической форме через входные динамические процессы на входах  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  таким образом:

$$\begin{aligned} y^{\wedge}(t) &= x_1(t) \wedge x_2(t) = \\ &= 1(B^1 \wedge A^2, B^1)0(-, -)1(B^2 \wedge A^3, B^2)\dots \\ &\dots 1(B^{m+k-1} \wedge A^{m+k}, B^{m+k-1}), \end{aligned} \quad (36)$$

где  $A^r$ ,  $B^r$  — определители ранга  $r$  вида  $A^r = \begin{vmatrix} a_1 & \dots & a_m \\ c_1 & \dots & c_k \end{vmatrix}^r$ ,  $B^r = \begin{vmatrix} b_1 & \dots & b_m \\ d_1 & \dots & d_k \end{vmatrix}^r$ , раскрываемые соответственно по формулам

$$A^r = \bigvee_{i+j=r+1} (a_i \wedge c_j), \quad B^r = \bigvee_{i+j=r+1} (b_i \wedge d_j). \quad (37)$$

В правых частях формул (36), (37) присутствуют операции дизъюнкции  $\vee$  и конъюнкции  $\wedge$  непрерывной логики. Из формул (36), (37) видно, что двоичный динамический процесс  $y^{\wedge}(t)$  на выходе конъюнктора с произвольными двоичными динамическими процессами на двух его входах  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  выражается в аналитической форме через  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  с помощью дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики.

Двоичный динамический процесс  $y(t)$  на выходе инвертора с произвольным двоичным динамическим процессом на его входе  $x_1(t)$  (35) выражается через  $x_1(t)$  следующим образом [7—9]:

$$\begin{aligned} y(t) &= \overline{x_1(t)} = \\ &= 0(a_1, b_1)1(-, -)0(a_2, b_2)\dots 0(a_m, b_m). \end{aligned} \quad (38)$$

Из (35), (36) видно, что двоичный динамический процесс  $y(t)$  на выходе элемента-инвертора с любым двоичным динамическим процессом на его входе  $x_1(t)$  выражается в аналитической форме через  $x_1(t)$  без помощи логических операций — просто в процессе  $x_1(t)$  значения 1 заменяются на 0, а значения 0 заменяются на 1.

Для нахождения аналитической формы двоичного динамического процесса  $y(t)$  на выходе всего автомата достаточно просто применить метод подстановок [7—9] к реализующему динамический автомат булеву логическому  $(n, 1)$ -полюснику (типа рис. 5), разбитому на последовательные, от входов к выходу, ступени глубиной в один элемент каждая. Метод состоит в последовательном вычислении сначала по заданным двоичным динамическим процессам на входах автомата  $x_1(t)$ , ...,  $x_n(t)$  двоичных динамических процессов на выходах его первой ступени, затем в нахождении по уже вычисленным процессам на выходах первой ступени динамических процессов на выходах второй ступени и т. д., пока не вычислим двоичный динамический процесс на выходе последней ступени, который является одновременно искомым двоичным динамическим процессом  $y(t)$  на выходе всего автомата. На каждом шаге описанной последовательной вычислительной процедуры требуются лишь две формулы: (36) и (38), описывающие в аналитическом виде соотношения между входными и выходными динамическими процессами двух элементов — конъюнктора и инвертора, ибо реализующий автомат булев  $(n, 1)$ -полюсник построен лишь из этих двух элементов. Но названные формулы не содержат других операций, кроме дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики. Следовательно, определенный с помощью описанной процедуры выходной динамический процесс автомата  $y(t)$  будет выражаться в аналитической форме через его входные процессы  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , с помощью операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики. Учитывая, что формула (36) выражает конкретно моменты изменения состояния динамического процесса на выходе конъюнктора соответствующими суперпозициями указанных операций над множеством моментов изменения состояний входных процессов конъюнктора, а формула (38) для динамического процесса на выходе инвертора не содержит этих либо других операций для фиксации моментов этого процесса, предыдущее утверждение можно уточнить. Именно, любой момент изменения состояния выходного процесса автомата  $y(t)$  выражается суперпозицией дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики над множеством моментов изменения состояния входных процессов  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Что и требовалось доказать.

#### 4. Решение проблемы

Теперь мы можем дать решение проблемы аналитического представления результата произвольной суперпозиции теоретико-множественных операций, выполняемых над произвольной совокупностью непрерывных множеств, сформулированной в п. 1. Для этого дадим ответы на четыре вопроса п. 1.

*Ответ на вопрос 1.* Результирующее множество  $B$ , полученное суперпозицией  $B = \mathbf{F}(A_1, \dots, A_n)$  теоретико-множественных операций над совокупностью исходных множеств  $A_1, \dots, A_n$  (2), всегда можно выразить в аналитической форме через исходные множества, выразив параметры  $c_k, d_k, k = \overline{1, N}$ , множества  $B$  (2) в виде соответствующих функций  $f_k, \varphi_k, k = \overline{1, N}$ , от числовых параметров  $a_{ij}, b_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$ , исходных множеств  $A_1, A_2, \dots, A_n$  (1).

Действительно, как показано в п. 2, адекватной математической моделью произвольного теоретико-множественного преобразования  $\mathbf{F}: \{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  вида (2) является конечный динамический автомат без памяти с  $n$  входами и одним выходом, входные процессы которого моделируют исходные множества  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , выходной процесс моделирует результирующее множество  $B$ , а реализуемая на выходе автомата булева функция его входов моделирует само преобразование  $\mathbf{F}$ .

Следовательно, для выражения в искомой аналитической форме результирующего множества  $B$  через исходные множества  $A_1, \dots, A_n$  достаточно выразить в аналитической форме выходной процесс динамического автомата-модели через входные процессы. Последнее, по теореме 1, всегда возможно.

*Ответ на вопрос 2.* Алгеброй вещественных чисел, с помощью которой можно выразить нужные нам функции  $c_k = f_k(a_{ij}, b_{ij}), d_k = \varphi_k(a_{ij}, b_{ij}), k = \overline{1, N}$ , представляющие в аналитической форме зависимость результирующего множества  $B$  (2) от исходных  $A_1, A_2, \dots, A_n$  (1), является алгебра непрерывной логики, а необходимыми для указанного выражения операциями этой алгебры являются дизъюнкция (15) и конъюнкция (16) непрерывной логики.

Действительно, функции  $c_k = f_k(a_{ij}, b_{ij})$  и  $d_k = \varphi_k(a_{ij}, b_{ij}), k = \overline{1, N}$ , согласно п. 2, в терминах конечного динамического автомата без памяти, моделирующего преобразование  $\mathbf{F}: \{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  вида (2), дают зависимости моментов  $c_k, d_k$  изменения состояний выходного процесса автомата от моментов  $a_{ij}, b_{ij}$  изменения состояний его входных процессов. А эти зависимости, согласно теореме 1, выражаются соответствующими суперпозициями операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) не-

прерывной логики над множеством  $\{a_{ij}, b_{ij}\}$  моментов изменения состояний входных процессов автомата.

*Ответ на вопрос 3.* Существует алгоритм построения нужных нам аналитических зависимостей числовых параметров  $c_k, d_k, k = \overline{1, N}$ , результирующего множества  $B$ , полученного суперпозицией  $B = \mathbf{F}(A_1, \dots, A_n)$  теоретико-множественных операций над совокупностью исходных множеств  $A_1, \dots, A_n$ , от параметров  $a_{ij}, b_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$  множеств  $A_1, \dots, A_n$  (1).

Действительно, согласно п. 2 существует алгоритм перехода от теоретико-множественного преобразования  $\mathbf{F}: \{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  вида (2) к моделирующему его конечному динамическому автомату без памяти, входные процессы которого моделируют множества  $A_1, \dots, A_n$ , выходной процесс моделирует результирующее множество  $B$ , а реализуемая на выходе булева логическая функция входов моделирует само преобразование  $\mathbf{F}$ . Далее, согласно теории динамических автоматов [8, 9] существуют алгоритмы вычисления в аналитической форме выходного процесса любого конечного динамического автомата без памяти через его входные процессы. Видим, что сочетание первого и второго дает нужный нам алгоритм построения аналитических зависимостей числовых параметров  $c_k, d_k$  результирующего множества  $B$  от числовых параметров  $a_{ij}, b_{ij}$  исходных множеств  $A_1, \dots, A_n$ .

*Ответ на вопрос 4.* Любой алгоритм построения аналитических зависимостей числовых параметров  $c_k, d_k, k = \overline{1, N}$ , результирующего множества  $B$ , полученного некоторой суперпозицией  $B = \mathbf{F}(A_1, \dots, A_n)$  теоретико-множественных операций над совокупностью множеств  $A_1, \dots, A_n$ , от числовых параметров  $a_{ij}, b_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m_i}$ , множеств  $A_1, \dots, A_n$ , состоит из трех последовательно применяемых алгоритмов:

1) алгоритм построения динамико-автоматной модели преобразования  $\mathbf{F}: \{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  (2);

2) алгоритм вычисления в аналитической форме выходного процесса динамического автомата-модели преобразования  $\mathbf{F}: \{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  — через его входные процессы;

3) алгоритм вычисления по найденному выходному процессу автомата-модели преобразования  $\mathbf{F}: \{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  — зависимости результирующего множества  $B$  этого преобразования от его исходных множеств  $A_1, \dots, A_n$ .

#### 5. Алгоритмы решения задач

Названные в конце п. 4 алгоритмы, составляющие в совокупности алгоритм решения всей проблемы нашей статьи, можно описать так.

1. Алгоритм построения динамико-автоматной математической модели теоретико-множественного преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$ .

**Шаг 1.** По выражению для  $M_{A_i}(x)$  (4) переходим от заданных множеств  $A_1, \dots, A_n$  (1) к их функциям принадлежности  $M_{A_1}(x), \dots, M_{A_n}(x)$ :

$$\begin{aligned} M_{A_1}(x) &= \\ &= 1(a_{11}, b_{11})0(-, -)1(a_{12}, b_{12})\dots 1(a_{1m_1}, b_{1m_1}); \\ M_{A_2}(x) &= \\ &= 1(a_{21}, b_{21})0(-, -)1(a_{22}, b_{22})\dots 1(a_{2m_2}, b_{2m_2}); \quad (39) \\ &\text{-----} \\ M_{A_n}(x) &= \\ &= 1(a_{n1}, b_{n1})0(-, -)1(a_{n2}, b_{n2})\dots 1(a_{nm_n}, b_{nm_n}). \end{aligned}$$

Интерпретируя величину  $x$  как время, рассматриваем функции (39) как двоичные временные процессы со значениями 0 или 1 и принимаем их за входные процессы автомата без памяти с  $n$  входами и одним выходом, который является математической моделью преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  (2).

**Шаг 2.** По той же формуле (4) переходим от пока неизвестного, подлежащего нахождению результирующего непрерывного множества  $B$  преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  (2), к функции принадлежности  $M_B(x)$ . В результате получаем пока неизвестную двоичную функцию вида

$$M_B(x) = 1(c_1, d_1)0(-, -)1(c_2, d_2)\dots 1(c_N, d_N). \quad (40)$$

Аналогично шагу 1, интерпретируя  $x$  как время, рассматриваем функцию (40) как двоичный временной процесс со значениями 0 или 1 и принимаем его за пока неизвестный выходной процесс динамического автомата без памяти — модели преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  вида (2).

**Шаг 3.** По формулам (8)—(10) переходим в преобразовании  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  (2) от теоретико-множественных операций  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  к соответствующим булевым логическим операциям  $\vee, \wedge, \bar{\phantom{x}}$ , одновременно заменяя множества  $B, A_i$  на их функции принадлежности  $M_B(x), M_{A_i}(x)$ . В результате получаем булеву логическую функцию  $F_M$ , которую принимаем за функцию входов конечного динамического автомата без памяти — математической модели преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  вида (2), реализуемую на выходе автомата.

**Шаг 4.** Строим конечный динамический автомат без памяти с  $n$  входами и одним выходом, с входными процессами вида (39), определенными на шаге 1, выходным процессом вида (40), установ-

ленным на шаге 2, и реализуемой на выходе булевой функцией входов, найденной на шаге 3. Построенный конечный динамический автомат является искомым математической моделью заданного преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  (2). На входы модели поступают функции принадлежности заданных множеств  $A_1, \dots, A_n$  (1), с выхода модели снимается функция принадлежности множества  $B$  — результата преобразования  $F$  множеств  $\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$ . Реализуемая на выходе модели функция входов преобразует функции принадлежности  $A_1, \dots, A_n$  в функцию принадлежности множества  $B$ , являющегося результатом заданного преобразования этих множеств  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$ . Построенная модель имеет вид булева логического  $(n, 1)$ -полюсника (см. рис. 3), синтезированного из логических элементов, показанных на рис. 4.

2. Алгоритм вычисления в аналитической форме выходного процесса конечного динамического автомата без памяти — модели преобразования множеств  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  — через его входные процессы.

Имеется несколько различных алгоритмов вычисления в аналитической форме выходного процесса конечного динамического автомата без памяти через его входные процессы, различающихся областью применения, эффективностью и т. д. Часть из них описана в п. 3, другие — в [7—9].

3. Алгоритм нахождения по выходному процессу автомата — модели преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  — результирующего множества  $B$  преобразования, выраженного через его исходные множества  $A_1, \dots, A_n$ .

Выходной процесс автомата является, согласно п. 2, функцией принадлежности  $M_B(x)$  результирующего множества  $B$  преобразования  $F$ , выраженного через его исходные множества  $A_1, \dots, A_n$ . Поэтому названный алгоритм состоит из единственного шага.

**Шаг 1.** Согласно (4) переходим от функции принадлежности  $M_B(x)$  множества  $B$ , полученной на шаге 2 алгоритма 1, к самому множеству  $B$ :

$$\begin{aligned} M_B(x) &= 1(c_1, d_1)0(-, -)1(c_2, d_2)\dots 1(c_N, d_N) \Rightarrow \\ &\Rightarrow B = \{[c_1, d_1], [c_2, d_2], \dots, [c_N, d_N]\}. \quad (41) \end{aligned}$$

В полученном соотношении (41) числовые параметры  $c_k, d_k, k = \overline{1, N}$ , результирующего множества  $B$  выражены в терминах суперпозиции операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики от числовых параметров  $a_{ij}, b_{ij}$  исходных множеств  $A_1, \dots, A_n$  заданного теоретико-множественного преобразования  $F:\{A_1, \dots, A_n\} \Rightarrow B$  вида (2).

**Пример.** Над конкретной заданной совокупностью четырех непрерывных множеств вида (1)  $A_1 = [a_1, b_1], A_2 = [a_2, b_2], A_3 = [a_3, b_3], A_4 = [a_4, b_4]$  совершается преобразование в виде следующей су-

перпозиции теоретико-множественных операций типа **F** (2):

$$B = \overline{(A_1 \cap A_2) \cup (A_3 \cap A_4)}.$$

Надо выразить в аналитической форме результат преобразования (множество  $B$ ) через множества  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , т. е. представить  $B$  в виде последовательности непересекающихся отрезков  $B = \{[c_1, d_1], \dots, [c_N, d_N]\}$ , где  $c_k = f_k(a_i, b_i)$ ,  $d_k = \varphi_k(a_i, b_i)$ ,  $k = \overline{1, N}$ ,  $i = \overline{1, 4}$ , — некоторые функции непрерывной логики, имеющие вид суперпозиции логических операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики над числовыми параметрами  $a_i, b_i, i = \overline{1, 4}$ , множеств  $A_1, A_2, A_3, A_4$ . Действуем согласно вышеописанным алгоритмам.

1. Строим динамико-автоматную модель заданного теоретико-множественного преобразования  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$ .

**Шаг 1.** Переходим от изначально заданных множеств  $A_i$  к их функциям принадлежности  $M_{A_i}(x)$ :

$$M_{A_1}(x) = 1(a_1, b_1), M_{A_2}(x) = 1(a_2, b_2),$$

$$M_{A_3}(x) = 1(a_3, b_3), M_{A_4}(x) = 1(a_4, b_4).$$

Полученные функции с единичными значениями в указанных интервалах и нулевыми значениями вне их рассматриваем как двоичные процессы, со значениями 0 или 1, разворачивающиеся во времени  $x$ . Их принимаем за входные процессы конечного автомата без памяти с четырьмя входами и одним выходом — математической модели теоретико-множественного преобразования  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$ .

**Шаг 2.** Аналогично шагу 1 переходим от множества  $B$  в принятой его форме к соответствующей функции принадлежности

$$M_B(x) = 1(c_1, d_1)0(-, -)1(c_2, d_2)\dots 1(c_N, d_N).$$

Полученную двоичную функцию, принимающую значения 0 или 1, аналогично предыдущему, рассматриваем как двоичный процесс, развивающийся во времени  $x$ , и принимаем его за выходной процесс нашего динамического автомата-модели.

**Шаг 3.** Переходим в заданном преобразовании  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$  от теоретико-множественных операций  $\cup, \cap, \bar{\phantom{x}}$  к соответствующим логическим операциям  $\vee, \wedge, \bar{\phantom{x}}$  (формулы (8)—(10)), при этом одновременно заменяя множества  $B, A_i$  их функциями принадлежности  $M_B(x), M_{A_i}(x)$ . В итоге имеем булеву логическую функцию

$$M_B(x) \equiv F_M(M_{A_1}(x), M_{A_2}(x), M_{A_3}(x), M_{A_4}(x)) =$$

$$= \overline{(M_{A_1}(x) \wedge M_{A_2}(x)) \vee (M_{A_3}(x) \wedge M_{A_4}(x))}.$$

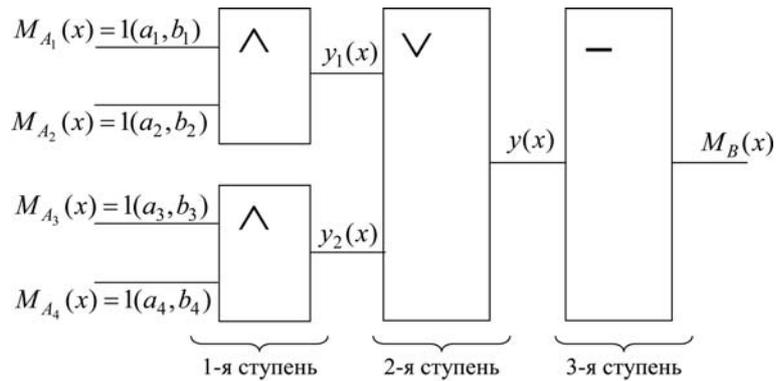


Рис. 7. Динамический автомат-модель преобразования **F**

Принимаем ее за булеву логическую функцию входов автомата-модели, реализуемую на его выходе.

**Шаг 4.** Строим динамический автомат с четырьмя входами и одним выходом, с входными процессами, найденными на шаге 1, выходным процессом вида, установленного на шаге 2, и реализуемой на выходе булевой логической функцией входов, найденной на шаге 3 (рис. 7). Построенный автомат является математической динамико-автоматной моделью заданного теоретико-множественного преобразования  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$ .

2. Вычисляем в аналитической форме выходной процесс конечного динамического автомата-модели преобразования  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$ . Используем алгоритм последовательных подстановок [7—9].

**Шаг 1.** По соотношению "входные процессы вида  $1(a, b)$  двухвходового конъюнктора — выходной процесс" (формула (33)) определяем процессы на выходах 1-й ступени схемы автомата-модели (рис. 7):

$$y_1(x) = 1(a_1, b_1) \wedge 1(a_2, b_2) = 1[(a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2), b_1 \wedge b_2];$$

$$y_2(x) = 1(a_3, b_3) \wedge 1(a_4, b_4) = 1[(a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4), b_3 \wedge b_4].$$

**Шаг 2.** По соотношению "входные процессы вида  $1(a, b)$  двухвходового дизъюнктора — выходной процесс" (формула (22) [3]) находим сначала процесс на выходе 2-й ступени схемы автомата-модели (рис. 7)

$$y(x) = y_1(x) \vee y_2(x) = 1(a, b) \vee 1(c, d),$$

а затем, после подстановки значений  $a, b, c, d$  из выражений  $y_1(x)$  и  $y_2(x)$  получаем окончательно

$$y(x) = 1[((a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2)) \wedge ((a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4)), (((a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2)) \wedge (b_3 \wedge b_4) \vee (((a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4)) \wedge (b_1 \wedge b_2))]0(-, -)1[(a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2) \vee (a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4), (b_1 \wedge b_2) \vee (b_3 \wedge b_4)].$$

**Шаг 3.** По соотношению "входной процесс — выходной процесс элемента-инвертора" (38) находим процесс на выходе 3-й степени схемы автомата-модели (рис. 7), т. е. на выходе самой схемы:

$$M_B(x) = \overline{y(x)} = 0[((a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2)) \wedge ((a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4)), (((a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2)) \wedge (b_3 \wedge b_4)) \vee (((a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4)) \wedge (b_1 \wedge b_2))]1(-, -)0[(a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2) \vee (a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4), (b_1 \wedge b_2) \vee (b_3 \wedge b_4)].$$

3. Находим по вычисленному выходному процессу автомата — модели теоретико-множественного преобразования  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$  — результирующее множество  $B$  этого преобразования.

**Шаг 1.** Переходим согласно формуле (41) от выходного процесса автомата-модели  $M_B(x)$ , имеющего смысл функции принадлежности результирующего множества  $B$ , к самому этому множеству:

$$M_B(x) = 0[\cdot]1(-, -)0[\cdot] \Rightarrow B = \{[-\infty, ((a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2)) \wedge ((a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4))], [(((a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2)) \wedge (b_3 \wedge b_4)) \vee (((a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4)) \wedge (b_1 \wedge b_2)), (a_1 \wedge b_2) \vee (b_1 \wedge a_2) \vee (a_3 \wedge b_4) \vee (b_3 \wedge a_4)], [(b_1 \wedge b_2) \vee (b_3 \wedge b_4), \infty]\}.$$

Итак, в полученном выражении множество  $B$  имеет вид последовательности трех непересекающихся отрезков, а его числовые параметры (точки начала и окончания отрезков) выражены в терминах суперпозиции операций дизъюнкции (15) и конъюнкции (16) непрерывной логики от числовых параметров  $a_i, b_i, i = \overline{1, 4}$ , исходных множеств  $A_1, A_2, A_3, A_4$  заданного теоретико-множественного преобразования  $\{A_1, A_2, A_3, A_4\} \Rightarrow B$ . Этот результат полностью решает для данного примера проблему, поставленную во введении.

## Заключение

Результаты данной работы показывают, что динамико-автоматная математическая модель совместна с аппаратом непрерывной логики для ее исследования представляя собой адекватные средства построения количественной и конструктивной теории множеств, ориентированной на различные приложения. Эта теория позволяет не только определять те или иные множества, но и эффективно вычислять различные количественные характеристики множеств, полученные в результате операций над заданными множествами, а также сами результирующие множества. Важной особенностью предлагаемой теории является аналитическая форма получаемых в ней результатов. Все это делает полезным и перспективным применение теории в различных областях, таких как распознавание образов, установление взаимоупорядоченности объектов, поиск в массивах и т. д.

## Список литературы

1. Серпинский В. Теория множеств. М.: Мир, 1960.
2. Джордж Ф. Основы кибернетики. М.: Радио и связь, 1984.
3. Левин В. И. Автоматная модель и методы распознавания зрительных образов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1991. № 3.
4. Искусственный интеллект. Книга 2: Модели и методы / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990.
5. Левин В. И. Непрерывная логика и решение комбинаторных задач // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 3.
6. Маргин В. А. Проектирование баз данных. М.: Мир, 1984.
7. Левин В. И. Введение в динамическую теорию конечных автоматов. Рига: Зинатне, 1975.
8. Левин В. И. Динамика логических устройств и систем. М.: Энергия, 1980.
9. Левин В. И. Теория динамических автоматов. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 1995.
10. Столл Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории. М.: Просвещение, 1968.

*Информация*

## Software Quality Assurance Days

30 ноября - 1 декабря 2012, Минск, Беларусь

**SQA Days** является конференцией №1 на пространстве СНГ и одним из главных событий в Восточной Европе, посвященных тематике тестирования и обеспечения качества программного обеспечения.

Конференция охватит широкий спектр профессиональных вопросов в области обеспечения качества, ключевыми из которых являются:

- Методики и инструменты тестирования ПО
- Автоматизация тестирования ПО
- Подготовка, обучение и управление командами тестировщиков
- Процессы обеспечения качества в компании
- Управление тестированием и аутсорсинг
- Совершенствование процессов тестирования и инновации

Организаторы конференции приглашают к сотрудничеству докладчиков, партнёров и других заинтересованных лиц.

Twitter лента конференции: #sqadays12

WWW.SQADAYS.COM

проект компании "Лаборатория тестирования" (www.sqlab.ru)

**Н. Е. Балакирев**, канд. техн. наук, проф.,  
**Е. В. Полицына**, аспирант,  
**Е. В. Мозина**, студент,  
 МАТИ—РГТУ им. К. Э. Циолковского,  
 e-mail: balakirev1949@yandex.ru,  
 kathrin.beaver@mail.ru

## Инструмент прогнозирования времени обработки в системе автоматизированного анализа текста

*При углублении автоматизированного анализа текста приходится использовать все более сложные алгоритмы, работающие с неформализованными данными, что приводит к существенному увеличению времени обработки, поэтому его оценка с теоретической и практической точки зрения является актуальной задачей.*

*Предлагается методика прогнозирования времени обработки, на основе которой система анализа текста предоставляет пользователю максимум информации для возможности выбора имеющихся средств обработки. Предлагаемая методика позволяет реализовать в системе адаптивный механизм оценки времени за счет сопоставления прогнозируемого и реального времени обработки и дальнейшей коррекции прогноза за счет накопленного "опыта".*

**Ключевые слова:** оценка времени обработки, инструмент прогнозирования времени, автоматизированный анализ текста, система анализа, обработка естественно-языкового текста

### Необходимость прогнозирования времени обработки

Объем текстовой информации, с которой приходится работать специалистам различных профессий, постоянно растет. В связи с этим появляется множество разработок средств автоматизации как поиска, так и анализа текстовой информации, включая классификацию, кластеризацию, индексирование, извлечение знаний и т. д. [1, 2].

При углублении анализа применяют сложные алгоритмы, работающие с неформализованными данными, что приводит к существенному увеличению времени обработки. Оно может варьироваться в широком интервале от нескольких минут до нескольких месяцев. Такому разбросу может быть множество объяснений; в данной статье оценка времени обработки ведется для конкретной системы анализа текста [3], предоставляющей пользователю средства для автоматизированной лингвистической и статистической обработки текстов и инструменты для аналитического решения задач извлечения,

анализа и обобщения информации, заключенной в тексте. Оценить это время с теоретической и практической точек зрения является актуальной задачей.

### Зависимость времени обработки от размера текста

В первую очередь логично исследовать зависимость времени обработки от размера текста, поэтому необходимо определить, что в данном случае понимается под размером текста. В общем случае для всех видов анализа первоначальной характеристикой является размер файла анализируемого текста. Но исследование на примере системы [3] показало, что размер текстового файла в байтах не является определяющей характеристикой для оценки времени обработки текста. Оно в первую очередь зависит от внутренней структуры текста, а также от используемых способов представления данных, применяемых алгоритмов и глубины анализа. Поэтому помимо размера файла необходима другая характеристика, которая в большей степени отражает свойства текста, но при этом может быть получена достаточно легко и быстро.

После прохождения этапа морфологического анализа может быть определено число различных слов в тексте (словник). Размер словника можно считать базовой характеристикой для определения зависимости времени обработки для рассматриваемого набора инструментов анализа, при этом время обработки на данном этапе весьма незначительно по сравнению со временем синтаксического и других более сложных видов анализа (заметим, что для других видов и алгоритмов анализа возможен выбор другой базовой характеристики).

При оценке времени обработки использовали инструменты графематического и морфологического анализа, построения словника текста и ассоциативной семантической сети с учетом видов синтаксических связей между словами. При этом текст был представлен в простом текстовом формате.

С ростом размера текста время его анализа возрастает нелинейно, что может сделать невозможным практическое использование системы или набора инструментов анализа. Размер текста, глубина его анализа и требуемое качество результата существенным образом определяют время обработки. В данном случае оценивается зависимость времени обработки от размера текста при условии, что:

- исследование проводили на компьютере с фиксированной конфигурацией;
- в процессе исследования алгоритмы анализа не изменялись;
- исследование проводили для ограниченного набора этапов анализа текста.

Была выполнена оценка времени обработки в зависимости от размера текстового файла в байтах и от размера словника. Для этого использовали восемь текстов отдельных литературных произведений Л. Н. Толстого, И. А. Гончарова, В. Гюго, М. Пьюзо, Г. Леру, критическая статья Д. И. Писарева, а также тексты, используемые при обучении русскому языку и чтению в начальных классах средней школы и тексты произведений М. А. Булгакова. Полученные данные приведены в таблице.

Для рассматриваемых в эксперименте инструментов анализа оценка на основе размера текстового файла при определении зависимости времени обработки является более грубой, но может быть использована для предварительной оценки перед началом обработки текста. Как видно из приведенных результатов, время обработки в большей степени зависит от числа различных встречающихся в тексте слов (размер словника). Время обработки нелинейно возрастает при увеличении размера словника, что наглядно представлено на графике (рис. 1).

Установив параметр, влияющий на время обработки, необходимо установить характер такой зависимости, т. е. оценочную функцию.

#### Оценка времени обработки в зависимости от размера текста

№	Размер текстового файла, Мбайт	Размер словника, слов	Время обработки, мин
1	0,04	1706	0,08
2	0,492	6839	1,23
3	0,836	9131	2,48
4	0,879	12 950	3,18
5	0,909	11 227	3,25
6	1,06	14 925	9,27
7	2,92	16 213	19,54
8	5,75	27 296	30,01

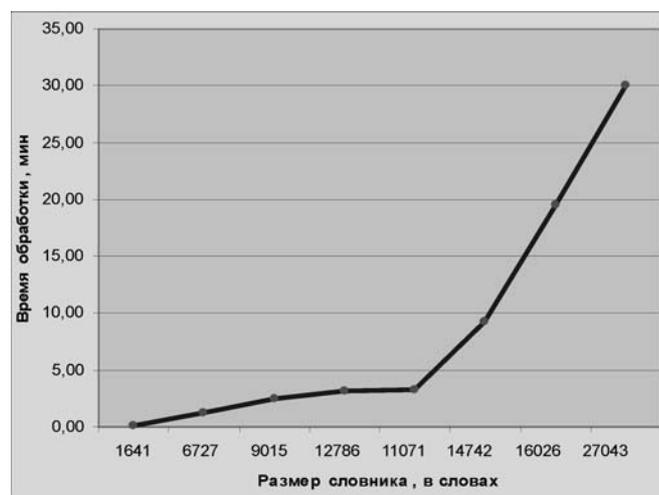


Рис. 1. Экспериментально полученный график зависимости времени обработки от размера текста

#### Определение функции зависимости времени обработки от размера текста

На основе экспериментально полученных данных для разных этапов обработки на разных текстах может быть получена формула зависимости и построена кривая регрессии. На графике (рис. 1) видно, что функция монотонно возрастает, не имеет экстремумов и стремится к бесконечности при возрастании аргумента. Из этого следует, что аппроксимирующую функцию можно искать в виде:

$$f_1(x) = ae^{kx} + c; f_2(x) = ax^b + c,$$

где  $x$  — размер текста;  $f_1(x), f_2(x)$  — время обработки;  $a, b, c, k$  — коэффициенты.

Будем искать аппроксимирующую функцию в виде  $f_1(x) = ae^{kx} + c, a > 0$ . Величину  $c$  можно найти по значению, к которому стремится  $f_1(x)$  при возрастании  $x$  (при  $k < 0$ ) или по значению  $f_1(x)$  при  $x = 0$  (при  $k > 0$ ), можно также воспользоваться формулой

$$c = \frac{f_1 f_2 - f_3^2}{f_1 + f_2 - 2f_3},$$

где  $f_1$  и  $f_2$  — ординаты произвольных (но достаточно далеких) точек с абсциссами  $x_1, x_2$ , а ордината  $f_3$  соответствует абсциссе  $x_3 = 1/2(x_1 + x_2)$ .

В качестве трех точек предлагается выбирать значение времени обработки для минимального, максимального обработанного текста и значение примерно из середины полученного интервала. Таким образом, при обработке каждого нового большого текста коэффициент будет пересчитываться.

Используя показательную регрессию (метод наименьших квадратов для показательной функции), получаем наилучшие коэффициенты  $a$  и  $k$ :

$$f_1(x) = ae^{kx} + c, a > 0.$$

Прологарифмируем равенство  $f_1(x) - c = ae^{kx}$ :

$$\begin{aligned} \ln(f_1(x) - c) &= \ln(ae^{kx}) = \\ &= \ln(a) + \ln(e^{kx}) = \ln(a) + kx. \end{aligned}$$

Пусть  $\ln(f_1(x) - c) = y_1(x), \ln(a) = b$ , тогда  $y_1(x) = kx + b$ .

Таким образом, показательная функция сведена к линейной и для расчета коэффициентов можно применять формулы для линейной регрессии, ко-

торые выводятся из системы линейных уравнений по методу наименьших квадратов:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2};$$

$$b = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i - k \sum_{i=1}^n x_i \right),$$

где  $X$  и  $Y$  — массивы значений размера текста и времени обработки;  $n$  — число точек.

Осуществив обратную замену переменных, получаем коэффициенты уравнения  $f_1(x) = ae^{kx} + c$ .

Полиномиальная функция также удовлетворяет необходимым требованиям зависимости времени обработки от размера текста и имеет вид:  $f_2(x) = ax^b + c$ .

Во всех случаях  $y = a$  при  $x = 1$ . При  $b > 1$  в точке  $x = 0$  кривая касается оси абсцисс. В этом случае, чем больше  $b$ , тем ближе подходит кривая к оси абсцисс при  $0 < x < 1$  и тем быстрее она возрастает при  $x > 1$ . При  $0 < b < 1$  в точке  $x = 0$  кривая касается оси ординат. При  $-1 < b < 0$  кривая ближе подходит к оси ординат, чем к оси абсцисс, при  $b = -1$ , наоборот.

Значения аргумента и функции положительны, поэтому прологарифмируем равенство при условии  $a > 0$ :

$$\ln f_2(x) = \ln a + b \ln x.$$

Введем новую переменную  $t = \ln x$ , тогда  $\ln f_2(x)$  будет функцией от  $t$ . Обозначим  $A = \ln a$ ,  $y_2(x) = \ln f_2(x)$ , уравнение примет вид:  $y(t) = A + bt$ , т. е. задача свелась к отысканию приближающей функции в виде линейной.

Далее для нахождения приближающей функции в виде степенной, нужно найти значения функции  $y_2(t)$ , прологарифмировав значения исходной функции  $f_2(x)$  и получить значения коэффициентов  $a$  и  $b$ :

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln t_i \ln y_i - \sum_{i=1}^n \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln y_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2},$$

$$a = e^{\left( \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \ln y_i - b \sum_{i=1}^n \ln t_i \right) \right)},$$

отсюда получаем массив значений  $T$  на основе данных о размерах текстов по формуле  $t = \ln x$  и массив значений  $Y$  на основе данных о времени обработки по формуле  $y_2(x) = \ln(f_2(x) - c)$ , где  $n$  — число точек.

Сравнение разных видов регрессии будем выполнять на основе экспериментально полученных данных о зависимости времени проведения графематического, морфологического анализа и построения ассоциативной семантической сети от размеров словариков обрабатываемых текстов.

Определив значения всех коэффициентов экспоненциальной функции, получаем

$$f_1(x) =$$

$$= 0,5163934883e^{(0,0001720957371x)} - 0,4277664975,$$

соответствующую ей линейную функцию в виде:

$$y_1(x) = 0,0001720957371x - 0,66088623.$$

Определив значения всех коэффициентов полиномиальной функции, получаем  $f_2(x) = 5,360879568 \cdot 10^{-9}x^{2,196266084} - 0,4277664975$  и соответствующую ей линейную функцию в виде:  $y_2(x) = 2,196266084x - 19,04413778$ .

На рис. 2 изображены графики двух полученных аппроксимирующих функций с отмеченными точками экспериментально полученными значениями. Кривая 1 — график экспоненциальной функции, кривая 2 — полиномиальной функции. Из рисунка видно, что в диапазоне экспериментальных значений обе функции проходят близко к заданным точкам, но с увеличением объема текста полиноми-

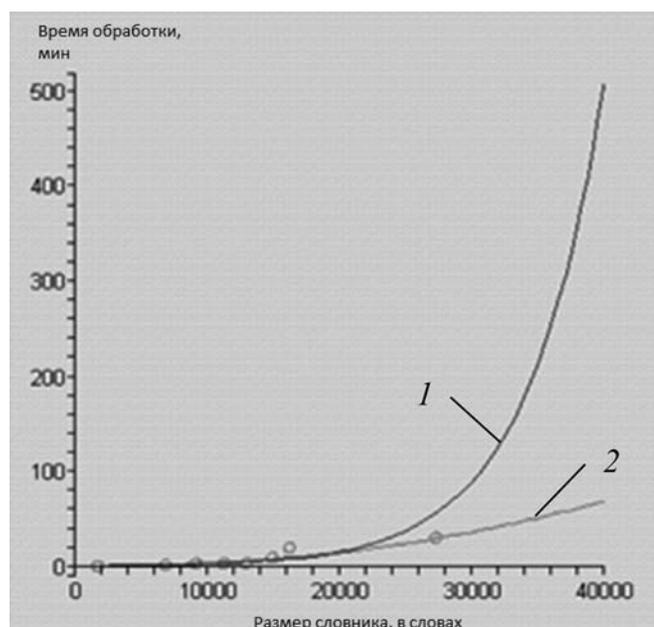


Рис. 2. Графики аппроксимирующих функций

альная функция возрастает намного медленнее, чем экспоненциальная, тогда как на практике время обработки сильно увеличивается.

Для определения лучшей аппроксимирующей функции из выбранных на известном интервале с использованием метода наименьших квадратов было показано, что для имеющихся экспериментальных значений лучшей является экспоненциальная функция.

### Методика прогнозирования времени обработки

Исходя из полученных результатов, методика прогнозирования времени обработки может включать в себя несколько этапов.

1. На основе экспериментальных данных провести анализ зависимости и подобрать один или несколько видов аппроксимирующих функций для выбранного набора инструментов анализа.

2. Определить коэффициенты выбранных функций, провести их анализ и выбрать лучшую аппроксимирующую функцию. Коэффициенты лучше определять для зависимости времени обработки от размера файла и другого параметра, от которого в большей степени зависит время обработки в конкретном алгоритме анализа (в данном случае в качестве такого параметра рассматривался размер словаря). Этот этап можно проводить не всегда, а например, с некоторой периодичностью (при увеличении количества обработанных текстов на порядок, например, 10, 100,  $n$ , ...).

3. Выбрать лучшую аппроксимирующую функцию с помощью метода наименьших квадратов для каждого случая зависимости — от размера файла, размера словаря.

4. Сразу после загрузки текста получить предполагаемое время обработки, подставив размер файла в соответствующую функцию, выбранную на этапе 3. Эта оценка является более грубой, но позволяет сразу получить ориентировочное время

обработки и сделать выводы о целесообразности анализа текста.

5. После проведения морфологического анализа и получения словаря текста, получить предполагаемое время обработки, подставив размер словаря в соответствующую функцию, выбранную на этапе 3. Такая оценка позволяет сделать окончательный вывод и принять решение о дальнейшей обработке текста целиком, разделении его на отдельные части, применении других инструментов анализа или принципиальной невозможности проанализировать текст.

### Интерфейс инструмента прогнозирования времени обработки

Система автоматизированного анализа текста [3] представляет собой веб-приложение, позволяющее пользователю решать широкий круг задач анализа текста с помощью набора инструментов для морфологической, лингвистической и аналитической обработки текста, которые комбинируются между собой. Эти возможности доступны пользователю в личном кабинете.

В системе автоматизированного анализа текста имеется возможность рассчитать время окончания обработки текста, это также доступно пользователю в личном кабинете на вкладке "Настройка обработки" (рис. 3).

Расписание обработки текстов представлено в виде таблицы. Наряду с названием текста пользователь может увидеть примерное время окончания обработки, статус задания, дату и время создания, запуска и окончания, может изменить порядок выполнения заданий в расписании обработки, отсортировать их по статусу выполнения, времени обработки и т. д.

При нажатии на поле "Название задания" происходит переход на вкладку настройки параметров задания (рис. 4). На ней доступен перечень всех возможных операций над текстом, из которого может быть выбран необходимый набор. После всех подготовительных работ пользователь сможет узнать примерное время, которое займет выполнение того или иного задания. Также пользователь имеет возможность удалить имеющееся задание или изменить его.

После выбора инструментов анализа и при нажатии на поле "Примерное время обработки" в расписании обработки текстов (см. рис. 3) показывается примерное расчетное время обработки. На основе этого строятся графики зависимости по имеющимся в системе данным о выбранном наборе

The screenshot shows a web interface titled "Личный кабинет" (Personal Cabinet). There are two tabs: "Настройка обработки" (Processing Settings) and "Расписание обработки" (Processing Schedule). The "Расписание обработки" tab is active, displaying a table titled "Расписание обработки текстов" (Text Processing Schedule). The table has 8 columns: "Название задания" (Task Name), "Текст" (Text), "Примерное время выполнения" (Estimated execution time), "Статус" (Status), "Время выполнения" (Execution time), "Задание создано" (Task created), "Задание запущено" (Task started), and "Задание выполнено" (Task completed). The first row contains "Задание 1" in the first column, with other cells being empty.

Название задания	Текст	Примерное время выполнения	Статус	Время выполнения	Задание создано	Задание запущено	Задание выполнено
Задание 1							

Рис. 3. Интерфейс расписания обработки в личном кабинете

инструментов анализа и отдельно использовании каждого инструмента. После оценки времени в расписании обработки текстов показывается приблизительное время выполнения задания.

После того, как пользователь отправил задание на выполнение, задание помещается в очередь заданий на сервере, а в поле "Задание запущено" отображается время до его запуска, которое рассчитывается исходя из текущей загрузки сервера. Как только задание принимается к исполнению на сервере, в поле "Задание запущено" отображаются дата и время запуска задания.

### Использование инструмента прогнозирования времени в системе анализа текста

Взаимодействие пользователя с системой анализа текста может в зависимости от задачи и его желания осуществляться несколькими способами путем использования системы хранения и предоставляемого набора средств работы с текстами и промежуточными данными, полученными в ходе обработки.

Для помощи пользователю в принятии решения относительно выбора инструментов анализа в пользовательской системе вводится модуль прогнозирования времени обработки, который вычисляет предполагаемое время обработки загруженного текста, тем самым предоставляя пользователю оценку, по которой он может выбрать оптимальный вариант взаимодействия с системой.

Таким образом, введение в систему анализа текста инструмента прогнозирования времени обработки текста позволяет пользователю:

- получать ориентировочное время окончания обработки;
- корректировать алгоритм и набор инструментов анализа для более оперативного получения результата.

Система предоставляет пользователю максимум информации для возможности выбора подходящего для конкретной задачи и исходных данных ал-

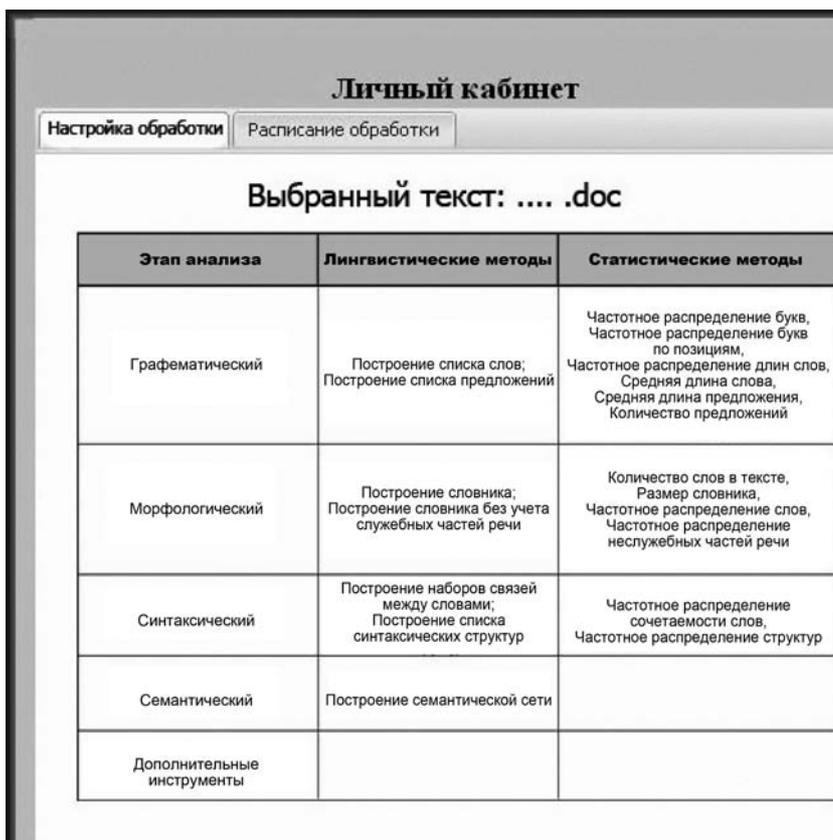


Рис. 4. Окно настроек задания

горитма использования имеющихся средств обработки. Предлагаемая методика прогнозирования времени обработки позволяет использовать в системе адаптивный инструмент оценки времени, результаты которого уточняются при каждом следующем использовании системы.

#### Список литературы

1. Нечипоренко А., Русин А. Система автоматизированного извлечения знаний из текстов на естественном языке // Труды Международной научно-технической конференции "Информационные системы и технологии — 2003". Новосибирск: НГТУ, 2003.
2. Баталина А. М., Епифанов М. Е., Кобзарева Т. Ю., Кушнарёва Е. В., Лахути Д. Г. Опыт экспериментальной реализации алгоритмов поверхностно синтаксического анализа // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: Труды Международной конференции "Диалог-2006". М.: Наука, 2006. С. 51—56.
3. Балакирев Н. Е., Добрышина Е. В. Концептуальная модель и структура системы обработки текстовой информации // Информационные технологии. 2010. № 2. С. 2—7.

УДК 621.391

**М. А. Вознюк**, д-р воен. наук, проф.,  
**С. В. Дворников**, д-р техн. наук доц., проф.,  
 e-mail: practicsv@yandex.ru  
**М. Е. Винокуров**, адъюнкт,  
**А. П. Петросян**, курсант  
**П. Г. Романенко**, канд. техн. наук, зам. нач. каф.,  
 Военная академия связи, г. Санкт-Петербург

## Работа линий радиосвязи с ППРЧ в условиях преднамеренных помех

*Предлагаются результаты исследования зависимости показателя прицельности помех при асинхронном (по отношению к тактовым моментам смены частоты) цикле подавления линий радиосвязи, использующих режим с программной перестройкой рабочей частоты. Приводятся данные зависимости вероятности совпадения по времени помехи и сигнала для различных значений режимов подавления и программной перестройки рабочей частоты. Даются рекомендации по организации связи в условиях постановки помех.*

**Ключевые слова:** режим асинхронного подавления, программная перестройка рабочей частоты, вероятность подавления

Одним из основных требований к системам радиосвязи является возможность их работы в условиях преднамеренных помех. Среди возможных направлений реализации данного требования перспективным видится использование режима с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) [1]. Реализация указанного режима предполагает в ходе сеанса связи кратковременную работу на заранее подготовленных субчастотах (от 256 и более) в диапазоне, как правило, до 1 МГц, но могут быть и выше (в ВЧ диапазоне), смена которых осуществляется псевдослучайным образом [2].

В ходе информационного противоборства основными источниками преднамеренных помех являются средства радиоэлектронного подавления (РЭП). В большинстве существующих средств РЭП реализован асинхронный способ с погоней по частоте, который предполагает поиск сигналов линии радиосвязи (ЛРС), использующей режим с ППРЧ,

с последующим их подавлением [3]. Причем сам процесс подавления происходит в соответствии с временным циклом "контроль — подавление", организация которого предусматривает периодическую проверку факта работы ЛРА на текущей субчастоте.

Учитывая постоянное совершенствование средств РЭП, целесообразно оценить потенциальные возможности реализованного в них асинхронного способа подавления в целях перспектив применения режима с ППРЧ в ВЧ диапазоне.

В теории и практике средств РЭП ВЧ радиосвязи эффективность прицельной помехи с запаздывающей погоней за субчастотой ЛРС с ППРЧ согласно [3] оценивается вероятностью подавления  $P_{\Pi}$ , т. е. того, что в произвольный момент времени на интервале существования подавляемого сигнала  $\tau_c$ , присутствует помеха. В свою очередь,  $P_{\Pi}$  определяется вероятностью совпадения помехи с сигналом во времени и по частоте:

$$P_{\Pi} = P_{\tau_c} \{T_{\Pi}\} P_f \{M, M_r, P_k\}, \quad (1)$$

где  $P_{\tau_c} \{T_{\Pi}\}$  — вероятность совпадения времени существования сигнала  $\tau_c$  с интервалом подавления  $T_{\Pi}$ ;  $P_f \{M, M_r, P_k\}$  — вероятность совпадения излучения прицельной помехи на текущей частоте работы ЛРС, которая зависит от размера группы рабочих частот, вскрытых аппаратурой поиска  $M_r$  в полной группе рабочих частот  $M$ , используемых для работы подавляемой ЛРС ( $M_r \leq M$ ), а также вероятности правильного определения номинала текущей рабочей частоты  $P_k$  (из числа  $M_r$ , т. е. уже известных частот) за время  $\tau_{\Delta}$ .

Заметим, что длительность интервала подавления зависит от  $T_{\Pi}$  — рабочего цикла, выделяемого на подавление станции прицельных помех:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi} - \tau_{\Delta}. \quad (2)$$

В общем случае значение вероятности  $P_f$  можно рассчитать как

$$P_f = \frac{M_r}{M} P_k, \quad M_r \leq M, \quad 0 \leq P_k \leq 1. \quad (3)$$

В выражении (3) отношение  $\frac{M_r}{M}$  характеризует полноту априорных сведений о номиналах субчастот ППРЧ, которые определяют в конечном итоге вероятность обнаружения текущей позиции при их смене, поэтому обозначим указанное отношение как вероятность определения полноты группы рабочих частот  $P_M = \frac{M_r}{M}$ . Тогда, подставив (3) в выражение (1), получим

$$P_{\Pi} = P_t P_M P_K. \quad (4)$$

Анализ (4) в работе [4] показал, что все три сомножителя, входящие в состав указанного выражения, оказывают равное влияние на результирующий показатель степени прицельности помех, излучаемых станцией прицельных помех при подавлении ЛРС с ППРЧ до 100 скачков в секунду.

В асинхронном (по отношению к тактовым моментам смены частоты объекта РЭП) рабочем цикле "контроль — подавление" станции прицельных помех процесс слежения за сменой рабочих частот подавляемой ЛРС осуществляется в периодических паузах на излучение помех с использованием контрольного приемника, для которого априорными данными являются номиналы рабочих частот из группы  $M_r$ .

Заметим, что формирование списка группы  $M_r$  может выполняться как на этапе предварительного поиска, так и в период временных интервалов между излучением помех непосредственно в процессе подавления.

Рассмотрим оценку (4) с позиций вероятности совпадения времени существования сигнала с интервалом подавления. Данный показатель характе-

ризуется степенью прицельности преднамеренных помех ЛРС с ППРЧ и оценивается средней долей общего времени существования сигналов, совпадающей с прицельной помехой по частоте и времени ее излучения:

$$P_t = \frac{\tau_c - \sum_{i=1}^N \Delta t_i}{\tau_c}, \quad (5)$$

где  $\Delta t_i$  — отрезки временного интервала на длительности сигнала  $\tau_c$ , не совпадающие с прицельной по частоте помехой;  $N$  — среднее число интервалов несовпадения на длительности существования подавляемого сигнала  $\tau_c$ .

На рис. 1 приведены диаграммы, характеризующие процесс постановки прицельных помех линии радиосвязи с ППРЧ при асинхронном цикле "контроль — подавление". Интервалы, подверженные воздействию помех, отмечены темным цветом.

Очевидно, что максимальное значение вероятности  $P_t$  обеспечивается при знании полного списка номиналов группы рабочих частот ЛРС с ППРЧ ( $M_r = M$ ) и условии их достоверного контроля ( $P_K = 1$ ).

Необходимо отметить, что значение длительности первого отрезка несовпадения  $\Delta t_1$  в общем случае является случайной величиной, которая при асинхронном режиме подавления будет равномерно распределена на интервале  $T_{\Pi} - \tau_{\Delta}$ . Следовательно, его среднее значение можно определить равным половине длительности цикла "контроль — подавление" без учета времени обнаружения, т. е.  $(T_{\Pi} - \tau_{\Delta})/2$  [5]. Тогда все последующие значения  $\Delta t_i$ ,  $i = 2, 3, \dots$ , будут определяться только числом ин-

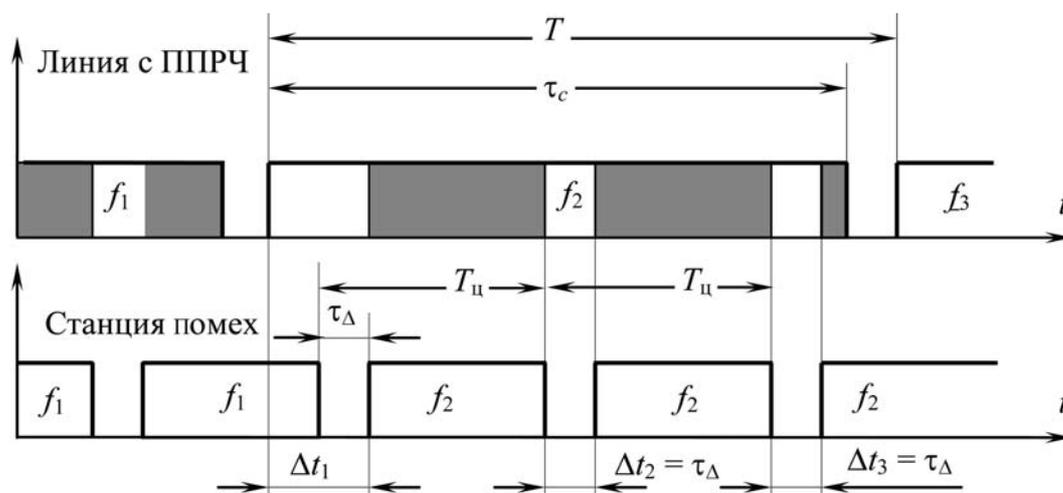


Рис. 1. Временные диаграммы процесса постановки прицельных помех линии радиосвязи с ППРЧ при асинхронном цикле "контроль — подавление" станции помех

тервалов  $\tau_{\Delta}$ , помещающихся на оставшемся промежутке времени длительности сигнала  $\tau_c$  без значения  $(T_{\text{ц}} - \tau_{\Delta})/2$ , отводимого на  $\Delta t_1$ :

$$\sum_{i=2}^N \Delta t_i = \frac{\tau_c - (T_{\text{ц}} - \tau_{\Delta})/2}{T_{\text{ц}}} \tau_{\Delta}. \quad (6)$$

С учетом (6) показатель (5) примет следующий вид:

$$P_t = \frac{\tau_c - \Delta t_1 - \sum_{i=2}^N \Delta t_i}{\tau_c} =$$

$$= 1 - \frac{(T_{\text{ц}} - \tau_{\Delta})}{2\tau_c} - \frac{\tau_{\Delta}}{T_{\text{ц}}} + \frac{T_{\text{ц}}\tau_{\Delta} - \tau_{\Delta}\tau_{\Delta}}{2T_{\text{ц}}\tau_c}, \tau_c > T_{\text{ц}}. \quad (7)$$

Заметим, что по своей сущности параметр  $\tau_{\Delta}$  представляет время реакции передатчика помех в цикле "контроль — подавление". Тогда величину среднего количества пауз  $N$  можно рассматривать как функцию показателя  $\gamma = \tau_c/T_{\text{ц}}$ . Следовательно, для заданных значений  $\tau_c$ ,  $T_{\text{ц}}$  и  $\tau_{\Delta}$ , в предположе-

нии невозможности контроля текущей субчастоты ЛРС с ППРЧ за время меньшее, чем  $\tau_{\Delta}$ , показатель (5) будет определяться как

$$P_t(\gamma) = 1 - \frac{1}{2\gamma} + \frac{\tau_{\Delta}}{\tau_c} - \frac{\tau_{\Delta}}{T_{\text{ц}}} - \frac{\tau_{\Delta}\tau_{\Delta}}{2\tau_c T_{\text{ц}}}, \tau_c > T_{\text{ц}}. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) зависит от величины  $\tau_c$  при точном определении значения  $\tau_{\Delta}$ . При такой неопределенности сложно получить наглядные зависимости, характеризующие показатель  $P_t$ , поэтому представим длительность цикла  $T_{\text{ц}}$  как функцию интервала обнаружения  $k = T_{\text{к}}/\tau_{\Delta}$ . Тогда показатель (8) перепишем в виде

$$P_t(\gamma, k) = 1 - \frac{1}{2\gamma} + \frac{1}{\gamma k} - \frac{1}{k} - \frac{1}{2\gamma k^2}, \tau_c > T_{\text{ц}}. \quad (9)$$

Зависимости  $P_t$  от  $\gamma$  при различных  $k$  представлены на рис. 2.

В настоящее время в средствах связи с ППРЧ используют два основных режима работы, на основе аналоговых видов модуляции и цифровых. Каждый из режимов оценивается своими показателями: аналоговый — степенью снижения качества речи, цифровой — возможностью используемых помехоустойчивых кодов.

В таблице приведены значения показателя временного совпадения сигналов ЛРС с ППРЧ и преднамеренных помех при условии обеспечения требуемого значения коэффициента подавления.

Анализ таблицы показывает, что передача информации становится невозможной при 30—40 % временного совпадения помехи и сигнала. Между тем, согласно рис. 2 такие условия обеспечиваются даже при совпадении длительности сигнала и цикла подавления, притом, что в пределах цикла РЭП фаза контроля (обнаружения сигнала) занимает половину отводимого на него времени. Таким образом, при условии равенства  $M_r$  и  $M$ , ЛРС с ППРЧ будут подавлены независимо от скорости смены частотных позиций (для допустимых в настоящее время технических возможностей средств связи ВЧ диапазона).

Для систем связи, использующих цифровые модуляционные форматы, рассмотренная ситуация усугубляется еще в большей степени. Это связано с тем, что исправляющая способность даже самых перспективных кодов не превышает 0,2 ошибок на бит.

Следовательно, единственной возможностью обеспечения гарантированной устойчивой работы ЛРС с ППРЧ в условиях помех является снижение вероятности  $P_M$  до 0,3, которую можно обеспечить

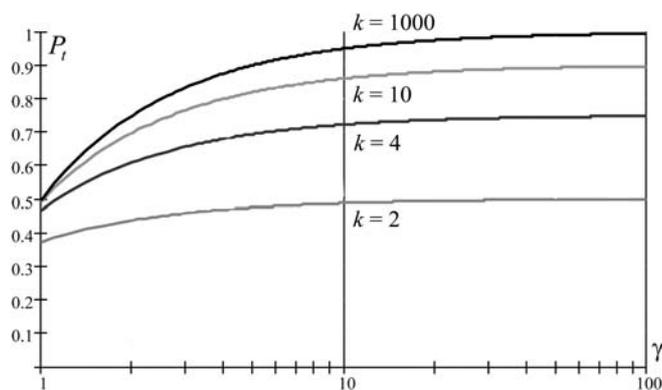


Рис. 2. Зависимость вероятности совпадения по времени от показателя  $\gamma$  при различных значениях  $k$

Степень ухудшения качества речи в зависимости от числа блокированных временных интервалов

Процент блокированных временных интервалов	Качественная характеристика ухудшения речи
5	Ухудшение имеет место, но малозаметно
10	Незначительное ухудшение разборчивости речи
20	Ухудшение значительное, но речь еще разборчива
30	Речь становится труднопонимаемой
40	Речь неразборчива

или за счет увеличения группы  $M$ , или снижения возможности вскрытия средствами мониторинга номиналов частот в группе  $M_r$ .

Между тем, учитывая, что у существующих средств РЭП интервал  $\tau_{\Delta}$  равен порядка 1 мс, а значение коэффициента  $k$  достигает 10, увеличение скорости до 1000 1/с также обеспечит устойчивую работу ЛРС с ППРЧ. Если же скорость ППРЧ составляет 100 1/с, то единственным способом обеспечения бесперебойной работы является снижение вероятности  $P_M$ .

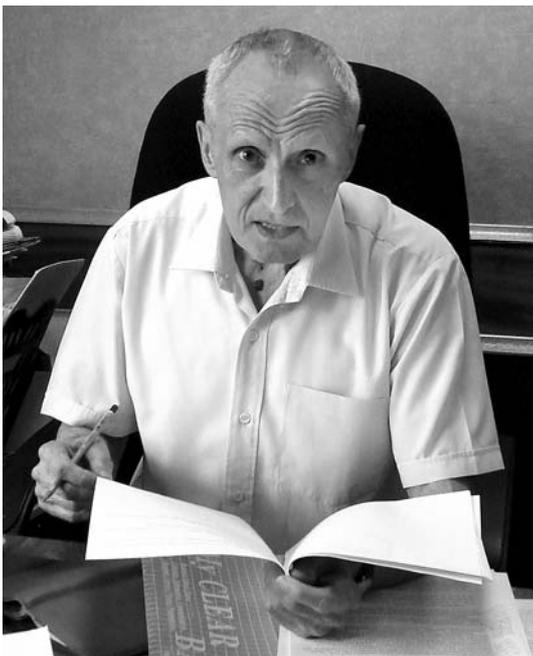
Таким образом, эффективное применение режима с ППРЧ в условиях преднамеренных помех возможно лишь при обеспечении скрытности не менее 60 % номиналов субчастот для подсистемы поиска средств РЭП (вопросы поиска субчастот ЛРС с ППРЧ подробно рассмотрены в работе [2]).

Другим перспективным направлением, обеспечивающим устойчивую связь ЛРС с ППРЧ, является увеличение скорости смены позиций (в настоящее время порядка 1000 1/с).

#### Список литературы

1. Kelley W. D. High frequency communications: new life for an old friend // Signal. Aug. 1987. P. 89–94.
2. Каргашин В. Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля // Специальная техника. 2000. № 3–5.
3. Быков В. В. Универсальная классификация радиоэлектронных помех // Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологией рабочей частоты // Радиотехника. 2006. № 6.
4. Анишин А. С., Батурич Ю. О., Васильев Д. И. Идентификация групп рабочих частот линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты // Радиотехника. 2006. № 6.
5. Анишин А. С., Ложкин К. Ю. Характеристики адресного обслуживания скрытых объектов системой с ограниченным контролем // Радиотехника. 1999. № 6.

## Поздравляем юбиляра!



Признанному корифею книгоиздания,  
директору издательства "Новые технологии",  
члену редколлегии журнала "Информационные технологии"

### Борису Игоревичу АНТОНОВУ

исполняется 75 лет.

За плечами Б. И. Антонова большая жизненная школа, связанная с издательским делом: от редактора издательства "Недра" до члена Главной редакции научно-технической литературы Госкомиздата СССР, главного редактора литературы по машиностроению и горному делу, главного редактора и первого заместителя директора издательства "Машиностроение".

За годы своей издательской деятельности Борис Игоревич проявил себя как блестящий редактор, креативный организатор, высококвалифицированный специалист, чуткий, отзывчивый и обаятельный человек. Он снискал широкую известность благодаря своему таланту и трудоспособности, инициативности и настойчивости.

Борис Игоревич Антонов является организатором издательства "Новые технологии" — одного из ведущих отечественных издательств в области приоритетных направлений науки и технологий. Он внес неоценимый вклад в становление и развитие целого ряда научно-технических журналов, входящих в перечень ВАК РФ, включая журнал "Информационные технологии".

*Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, благополучия, неиссякаемой энергии, оптимизма и успешного претворения в жизнь планов по дальнейшему развитию нашего любимого издательства.*

Редколлегия и редакция журнала.

УДК 528.8; 528.88; 519.72; 621.391

**Х. Г. Асадов**, д-р техн. наук, нач. отд.,  
e-mail: asadzade@rambler.ru,

**Дж. Г. Гашимов**, диссертант,  
НИИ аэрокосмической информатики, г. Баку

## Общая теория энтропийной фильтрации сигналов дистанционного зондирования текстурных объектов

*Показана возможность представления взаимосвязи входных и выходных параметров реальных измерительных систем в предлагаемой канонической форме.*

*Разработана общая теория энтропийной фильтрации сигналов дистанционного зондирования текстурных объектов.*

*Предложена методика синтеза энтропийных фильтров сигналов дистанционного зондирования текстурных объектов.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, фильтрация, энтропия, текстура, оптимизация

Хорошо известно, что классические методы фильтрации сигналов дистанционного зондирования обычно ставят целью повысить отношение сигнал/шум на выходе фильтра. Также существуют методы энтропийной фильтрации, обычно применяемые для сжатия и обработки графических данных [1]. В то же время энтропийные фильтры, позволяющие обработать сигналы, полученные при дистанционном зондировании текстурных объектов, отсутствуют.

Применительно к информационно-измерительным системам дистанционного зондирования, в которых существуют аддитивные и мультипликативные погрешности, имеет смысл сформировать специальный подкласс энтропийных фильтров, позволяющих максимизировать отношение интеграла энтропии одних показателей системы к энтропийной величине других.

Далее вышеопределенный специфический тип систем дистанционного зондирования для простоты изложения будем называть измерительной системой. Таким образом, обобщенным энтропийным

фильтром измерительной системы, описываемой уравнением

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n), \quad (1)$$

где  $x_i, i = \overline{1, n}$ , — в общем случае зависящие от времени  $t$  входные воздействия или внутренние состояния системы, будем называть устройство, обеспечивающее на выходе максимальное значение функционала

$$Z = \int_0^{t_{\max}} \ln f_1(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) dt \quad (2)$$

при выполнении условия

$$\int_0^{t_{\max}} f_2(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) dt = C,$$

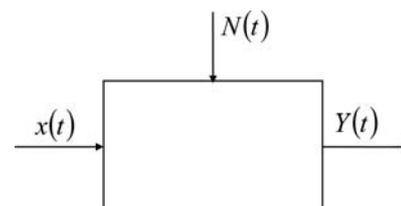
где  $f, f_1, f_2$  — непрерывные функции аргументов  $X_i, i = \overline{1, n}$ ;  $C = \text{const}$ .

При этом оптимизация энтропийного фильтра, т. е. максимизация величины  $Z$ , осуществляется путем выбора функции зависимости между определенными параметрами  $X_i$  и  $X_j, i \neq j; i, j = \overline{1, n}$ , т. е.  $X_i = \varphi(X_j)$  за счет уменьшения размерности множества  $\{X\}$ .

Таким образом, в настоящей статье ставится вопрос о синтезе энтропийного фильтра  $Z$  с выходным сигналом, достигающим максимального значения при выборе определенного вида функции  $X_i = \varphi(X_j)$ .

Задачу синтеза оптимального энтропийного фильтра  $Z$  решим с использованием классических понятий и положений теории измерительных систем.

В общем случае любая измерительная система может быть представлена в виде трехполюсника (см. рисунок), на входы которого поступают  $x(t)$  —



Схематическое представление измерительной системы

измерительный сигнал,  $N(t)$  — шумы, а на выходе которого появляется результат измерения  $Y(t)$ .

Для дальнейшего изложения метода синтеза энтропийного фильтра  $Z$  приведем выходной параметр рассматриваемой измерительной системы  $Y(t)$  в канонический вид. Хорошо известно, что согласно классическим положениям измерительной техники входной сигнал в тракте преобразования подвергается аддитивным и мультипликативным воздействиям, т. е. выходной сигнал системы может быть представлен как

$$Y(t) = x(t)f_m + f_a, \quad (3)$$

где  $f_m$  — параметр мультипликативного воздействия;  $f_a$  — параметр аддитивного воздействия.

Примем следующее представление  $f_m$ :

$$f_m = 1 + f_1. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) получаем

$$Y(t) = x(t)(1 + f_1) + f_a. \quad (5)$$

Далее, если принять наличие функциональной зависимости

$$f_a = \varphi(f_1), \quad (6)$$

то с учетом (5) и (6) получим

$$Y(t) = x(t) + \varphi(f_1) + x(t)f_1. \quad (7)$$

Таким образом, выходной параметр любой измерительной системы может быть представлен в виде суммы двух составляющих:

$$Y_1(t) = x(t) + \varphi(f_1), \quad (8)$$

$$Y_2(t) = x(t)f_1. \quad (9)$$

Компоненту  $Y_1(t)$  далее условно будем называть аддитивной компонентой, а  $Y_2(t)$  — мультипликативной компонентой.

Рассмотрим *первый вариант синтеза энтропийного фильтра*, который в общем случае имеет следующий вид:

$$Z_1 = \int_0^{t_{\max}} \ln[x(t)f_1(t)]dt \quad (10)$$

при

$$\int_0^{t_{\max}} [x(t)f_1(t)]dt = C. \quad (11)$$

В задаче синтеза оптимального интегрального энтропийного фильтра ставится задача нахождения такой оптимальной функции  $f_1(t)$ , при которой с учетом условия (11) функционал (10) достиг бы максимальной величины.

Рассмотрим решение первого варианта синтеза энтропийного фильтра.

Представим функционал  $\varphi(f_1)$  в первом приближении как

$$\varphi(f_1) = \varphi_0 + \varphi'f_1. \quad (12)$$

С учетом выражений (10)—(12) сформируем функционал безусловной оптимизации

$$\begin{aligned} Z_{1opt} &= \int_0^{t_{\max}} F[x(t), f_1(t)]dt = \\ &= \int_0^{t_{\max}} \ln[x(t)f_1(t)]dt + \lambda \int_0^{t_{\max}} [x(t)\varphi(f_1)]dt, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

Согласно методу Эйлера [3] функционал  $Z_{1opt}$  достигает максимума при такой функции  $f_1(t)$ , которая удовлетворяет условию

$$\frac{dF[x(t), f_1(t)]}{df_1(t)} = 0. \quad (14)$$

С учетом условия (14) из выражения (13) получаем следующее выражение:

$$\frac{1}{f_1(t)\ln 2} + \lambda\varphi' = 0. \quad (15)$$

Из выражения (15) имеем

$$\varphi' = -\frac{1}{\lambda(\ln 2)f_1(t)}. \quad (16)$$

Выражение (11) с учетом приближения (12) перепишем в следующем виде:

$$\int_0^{t_{\max}} [x(t) + \varphi_0 + \varphi'f_1]dt = C. \quad (17)$$

С учетом выражений (16) формула (17) примет вид

$$\int_0^{t_{\max}} \left[ x(t) + \varphi_0 - \frac{1}{\lambda(\ln 2)} \right] dt = C. \quad (18)$$

Интегрируя выражение (18), нетрудно вычислить следующую формулу для определения  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{t_{\max}}{\{[x(t) + \varphi_0]t_{\max} - C\}\ln 2}. \quad (19)$$

С учетом выражений (15) и (19) получим

$$\frac{1}{f_1(t)} = -\frac{\varphi' t_{\max}}{\{[x(t) + \varphi_0]t_{\max} - C\}}. \quad (20)$$

Из выражения (20) окончательно получаем

$$f_1 = \frac{C}{\varphi' t_{\max}} - \frac{[x(t) + \varphi_0]}{\varphi'}. \quad (21)$$

Анализируя полученное выражение (20), приходим к следующему выводу:

- если  $\varphi'$  является положительной величиной, то оптимальной зависимостью между  $f_1$  и  $x$  является обратная зависимость, т. е. рост  $x$  приводит к уменьшению  $f_1$ ;
- если  $\varphi'$  является отрицательной величиной, то оптимальной зависимостью между  $f_1$  и  $x$  является прямая зависимость.

Рассмотрим **второй вариант синтеза энтропийного фильтра**, который в общем случае имеет следующий вид:

$$Z_2 = \int_0^{t_{\max}} \ln[x(t) + \varphi(f_1)] dt. \quad (22)$$

при

$$\int_0^{t_{\max}} [x(t)f_1(t)] dt = C. \quad (23)$$

С учетом (22) и (23) безусловный функционал оптимизации имеет следующий вид:

$$Z_{2opt} = \int_0^{t_{\max}} \ln[x(t) + \varphi(f_1)] dt + \lambda \int_0^{t_{\max}} [x(t)f_1(t)] dt. \quad (24)$$

Таким образом, во втором варианте ставится задача нахождения такой оптимальной функции  $f_1(t)$ , при которой с учетом условия (23) функционал (24) мог бы достичь максимального значения.

С учетом формул (12)–(14) получаем

$$\frac{\varphi'}{(\ln 2)[x(t) + \varphi_0 + \varphi' f_1]} + \lambda x(t) = 0. \quad (25)$$

Из выражения (25) находим

$$f_1 = -\frac{1}{(\ln 2)\lambda x(t)} - \frac{x(t)}{\varphi'} - \frac{\varphi_0}{\varphi'}. \quad (26)$$

С учетом выражений (23) и (26) получим

$$\lambda = -\frac{t_{\max}}{(\ln 2) \left\{ C + \int_0^{t_{\max}} \left[ \frac{x^2(t)}{\varphi'} + \frac{x(t)\varphi_0}{\varphi'} \right] dt \right\}}. \quad (27)$$

Подставляя выражение (27) в формулу (26), окончательно получаем следующее выражение для вычисления  $f_1$ :

$$f_1 = \frac{C + \int_0^{t_{\max}} \left[ \frac{x^2(t)}{\varphi'} + \frac{x(t)\varphi_0}{\varphi'} \right] dt}{x(t)t_{\max}} - \frac{x(t) + \varphi_0}{\varphi'}. \quad (28)$$

Анализируя полученное выражение (28), можно прийти к следующему выводу:

- если  $\varphi'$  является отрицательной величиной, то  $f_1$  может расти или уменьшаться при росте  $x$ ;
- если  $\varphi'$  является положительной величиной, то  $f_1$  уменьшается при увеличении  $x$ .

Таким образом, на базе единых принципов формирования фильтра синтезированы два оптимальных фильтра, пригодные для обработки сигналов систем дистанционного зондирования текстурных объектов. Общая методика синтеза энтропийных фильтров следующая.

1. Изучаются все входы и выходы исследуемой системы дистанционного зондирования. Соотношения между указанными параметрами приводят в каноническую форму (7)–(9).

2. Обоснованно выбирается один из вышеописанных вариантов синтеза.

3. Определяется функция оптимальной взаимосвязи между основными параметрами системы, аналогичная соответственно выражениям (21) или (28).

4. Вычисляется максимальное достижимое значение функционала (13) или (24).

\*\*\*

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

- ♦ Показана возможность представления взаимосвязи входных и выходных параметров реальных измерительных систем в предлагаемой канонической форме.
- ♦ Разработана общая теория энтропийной фильтрации сигналов дистанционного зондирования текстурных объектов.
- ♦ Предложена методика синтеза энтропийных фильтров сигналов дистанционного зондирования текстурных объектов.

#### Список литературы

1. Nalbantoğlu O. U., Russell D. J., Sayood Kh. Data compression concepts and algorithms and their applications to bioinformatics // Entropy. 2010, N 12. P. 34–52.
2. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы. М.: Энергаториздат, 1985.
3. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1988.

# CONTENTS

<b>Trudonoshin V. A.</b> <i>The Evolution of Software for Dynamic System Simulation</i> . . . . .	4
---	---

The development of software for dynamic system simulation is considered on the base of history of simulation programs worked out in Bauman State Technical University. The programs are tools for simulation of systems described by ordinary differential equations.

**Keywords:** modeling, simulation, simulation software, mixed-mode simulation

<b>Manichev V. B., Zhuk D. M., Saharov M. K.</b> <i>SADEL — C-Library for Solution of Sets of Algebraic and Differential Equations with Maximum Precision</i> . . . . .	7
---	---

C-Library SADEL for extra precision solution of algebraic and differential equations systems is practical result of long-term research works of authors as a mathematical nucleus of a platform of mathematical simulation of dynamic processes for multi-physics or multi-discipline technical systems and objects (software suite PA10 (SADEL-PA10)), surpassing similar foreign software products MATLAB-SIMULINK, Maple-MapleSim, C-Library NAG and C-Library IMSL in a part of the solution of stiff ODE and badly conditioned LAE. Base introduction SADEL-PA10 is a mathematical modelling and simulation in time domain of systems and objects at designing products of microelectronics, nanoelectronics and mechatronics. Results of comparative testing of library are resulted.

**Keywords:** modelling, simulation, computer aided engineering, dynamical systems, ordinary differential equations (ODE), differential algebraic equations (DAE), linear algebraic equations (LAE), integration methods

<b>Artemenko Yu. N., Volkomorov S. V., Karpenko A. P., Martinuk V. A., Paschenko V. N., Temerev K. A., Sharigin A. V.</b> <i>The Parallel Multisection Manipulator for Orientation of the Space Observatory "Millimetron"</i> . . . . .	14
---	----

The paper is devoted to a variant of the space observatory "Millimetron". For antenna orientation of the observatory, a parallel multisection manipulator is used. We represent some research results of this manipulator, executed by means of CAD-systems SolidWorks and NX and by means of program system MatLab Simulink. To planning a trajectory of the antenna moving it is used the original software.

**Keywords:** space observatory "Millimetron", parallel mechanism, multisection manipulator of type a trunk

<b>Norenkov I. P., Uvarov M. Yu.</b> <i>Semantic Analysis of Documents</i> . . . . .	22
--	----

Semantic analysis of documents comprises text classification and annotation. The methods of semantic analysis are considered, they are based on role and thematic ontology clusterization.

**Keywords:** semantic analysis, classification, annotation, ontology, role ontology clusterization

<b>Bozhko A. N.</b> <i>Modeling of Positional Relationships in Mechanical Systems</i> . . . . .	27
---	----

The article discusses a new approach to the description of the mechanical connections, delivering elements of the machine or device definite position in the technical system. Binary mechanical and multinomial geometric relations are represented as hypernetwork. This substantial structural model provides a basis for formulating and solving many important problems of design and technological design. In particular, we show that the assembly of the product can be described as a sequence of normal contractions of hypernetwork. A new model of decomposition products on the assembly units is offered. It is formulated in terms of discrete mathematical programming. It is a universal system of constraints is based on hypernetwork and combines well with a variety of optimization criteria. In this article we consider an important special case when the decomposition criterion is the minimum number of coupling surfaces.

**Keywords:** assembly, mechanical connection, coupling, hypernetwork, basing, graph, hypergraph, contraction of the vertices, assembly unit, assembly structure

<b>Afinogenov E. I., Volosatova T. M., Selvesyuk N. I., Chichvarin N. V.</b> <i>The Systems Approach to Design Control Algorithms Considering Aircraft to Counter the Information Subsystems</i> . . . . .	34
--	----

In this paper we propose a new approach to solving the problem of choosing the structure of the law of the flight control aircraft (LA). The approach is based on building a generalized model of information subsystems of complex flight control of aircraft. The model takes into account the internal and external interference. The result of their use should be the set of equivalent control law, which can be used to meet the challenge of performance in the presence of noise in the data portion of the complex on-board. The basis for solving this problem put the block-hierarchical method of model representation of the object and design of CALS-technologies.

**Keywords:** aircraft, model complex control law, the information subsystem

**Zhuk D. M., Perfiliev S. A.** *Computer Aided Systems for Surgery — CAS-Systems* . . . . . 44

This paper addresses new approach to development of modern CAS system, which will be intended for automation in planning and support of operative treatment for maxillofacial surgery. It is proposed to consider process of treatment of the patient as uniform and continuous process directed on as much as possible treatment of the patient at minimization of all negative consequences and invasiveness for the patient. In the paper it is described structure of new CAS system with description of all steps of surgical process based on using of proposed CAS system. According to the proposed structure of process of surgical treatment it is necessary to work out the set of the 3D geometrical models. Those models are necessary for development new methods for simulation complex processes in anatomical structures of human body in time domain.

**Keywords:** CAS-systems, biomedical imaging, medical diagnosis, pathology, patient rehabilitation, surgery

**Levin V. I.** *Logical-Automata Theory of Sets* . . . . . 48

An automata-logical approach to construction of the applied quantitative theory of sets is offered. The finite dynamic automaton serves in it as adequate mathematical model of operations over sets and the continuous logic as adequate mathematical apparatus for effective calculation of these operations result.

**Keywords:** the sets theory, continuous logic, logic-automata model, finite dynamic automaton

**Balakirev N. E., Politsyna E. V., Mozina E. V.** *An Approach for Time Consumption Prediction in System of Automated Analysis of Text Information* . . . . . 59

Deeper text automated analysis requires more and more complicated algorithms which deal with unformalized data. That results in dramatic increase of time required for text processing. Practical and theoretical time estimation for this task is an actual problem.

An approach for making time consumption prediction is suggested. Basing on this approach text analysis system offers user maximum information for selecting suitable text processing algorithm using current available processing tools. This approach allows using an adjustable and flexible tool for time consumption prediction. Also results obtained on each request are stored and used for more accurate future estimations.

**Keywords:** processing time estimation, approach for time prediction, automated analysis of text information, system of analysis, natural language text processing

**Voznjuk M. A., Dvornikov S. V., Vinokurov M. E., Petrosyan A. P., Romanenko P. G.** *Operation of Lines of a Radio Communication with PROF in the Conditions of Deliberate Noises* . . . . . 64

Results of research of dependence of an index are offered at-integrity noises at asynchronous (in relation to the clock moments of change of frequency) a cycle of suppression of lines of the radio communication using a mode with program reorganization of operational frequency. The given dependences of probability of coincidence on time of a noise and a signal for various values of modes of suppression and program reorganization of operational frequency are cited. Recommendations about the organization of communication in the conditions of setting of noises are made.

**Keywords:** mode of asynchronous radio suppression, program reorganization of operational frequency, probability of suppression

**Asadov H. H., Hashimov J. H.** *General Theory of Entropy Filtration of Signals of Remote Sensing of Texture Objects*. . . . . 68

It is shown, that interrelation of input and output parameters of real measuring systems can be written in suggested canonical form.

The general theory of entropy filtration of signals of remote sensing of texture objects are developed.

The methodic for synthesis of entropy filters for signal of remote sensing of texture objects is suggested.

**Keywords:** remote sensing, filtration, entropy, texture, optimization

---

---

**Адрес редакции:**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Дизайнер *Т.Н. Погорелова*. Технический редактор *Е.В. Конова*.

Корректор *Е.В. Комиссарова*.

Сдано в набор 30.07.2012. Подписано в печать 20.09.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT1012. Цена договорная.

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.