

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(67)/2013

Учредитель  
ООО «Информационно-управляющие системы»

Главный редактор  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора  
Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь  
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Васильев,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Козлов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

К. Кристоделу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Б. Мейер,  
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подоплекин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. В. Симаков,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:  
В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

В. Ф. Мелехин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова  
Корректор: Т. В. Звертановская  
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко  
Компьютерная верстка: А. Н. Колешко

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.  
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

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

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через  
редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:  
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2013

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ**

**Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Матрица золотого сечения  $G_{10}$  2  
**Обертов Д. Е., Бардов В. М.** Алгоритм обнаружения транспортных  
средств с помощью акселерометров 6

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

**Подоплёкин Ю. Ф., Шаров С. Н.** Ключевые вопросы теории и проекти-  
рования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на мало-  
размерные суда 14

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

**Советов Б. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.** Оценка вероятности  
эрланговского старения информации 25  
**Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л.** Эргатические методы  
анализа процессов эксплуатации и принятия решений  
при повреждениях и авариях энергообъектов 29

**Буканов Ф. Ф., Сбродов В. В., Сафронов С. Г.** Компьютерное моде-  
лирование и полунатурные испытания оптико-электронных систем  
на автоматизированных стендах 37

**Горский О. В.** Исследование базовой модели  
индуктивно связанных контуров бесконтактного зарядного устройства  
имплантируемых систем 48

**ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА**

**Тарасов С. В., Бураков В. В.** Способы реляционного моделирования  
иерархических структур данных 58

**ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ**

**Белим С. В., Богаченко Н. Ф.** Применение метода анализа иерархий  
для оценки рисков утечки полномочий в системах с ролевым разграни-  
чением доступа 67

**КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ**

**Морозова Е. В., Мондикова Я. А., Молдовян Н. А.** Способы отрицае-  
мого шифрования с разделяемым ключом 73

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ**

**Колсанов А. В., Юнусов Р. Р., Иващенко А. В., Кузьмин А. В., Голо-  
ванов А. Е., Черепанов А. С., Зайцев Д. Ю.** Моделирование разреза  
при симуляционном обучении базовым навыкам лапаротомии 79

**УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ**

**Эюбова Н. И.** Методы классификации в диагностике уролитиаза  
с применением нечеткой логики для предобработки данных 85

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Шпилевой В. Ф., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В.,  
Кожевников С. С., Кольбова Э. В., Майоров И. В., Шепилов Я. Ю.**  
Разработка мультиагентной системы «Smart Factory» для оперативного  
управления ресурсами в режиме реального времени 91

**Антохина Ю. А.** Управление качеством образования  
в техническом автономном вузе 99

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

**Антохина Ю. А.** Основные понятия организационных схем проектно-  
ориентированного университета 102

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**АННОТАЦИИ** 104

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы»  
за 2013 г. [№ 1–6] 111

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы»  
за 2013 г. [№ 1–6] 116

Сдано в набор 25.10.13. Подписано в печать 10.12.13. Формат 60×84/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookС. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 13,7. Уч.-изд. л. 17,2. Тираж 1000 экз. Заказ 626.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 519.61:511-33

## МАТРИЦА ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ $G_{10}$

**Н. А. Балонин,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**М. Б. Сергеев,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассматриваются модульно двухуровневые матрицы, дополняющие матрицы Мерсенна и Эйлера. Дано определение слоя матриц. На примере континуальных матриц с варьируемыми уровнями показано, что ветвь матриц золотого сечения тесно связана с матрицами Белевича и Адамара, для нахождения которых матрицы золотого сечения могут быть использованы. Комментируются прикладные аспекты использования матриц золотого сечения.

**Ключевые слова** — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, матрицы Мерсенна, матрицы Эйлера, золотое сечение, матрица  $G_{10}$ .

### Введение

Анализ условий существования матриц Мерсенна [1] поднял вопрос о принадлежности квазиортогональных матриц к семейству, частными представителями которого являются матрицы Адамара [2], Мерсенна [3, 4], Эйлера [5] и Ферма [6]. Матрицы перечислены в последовательности убывания переменной  $d$  в значении их порядка  $n = 4k - d$ , где  $d = 0, 1, 2, 3$ .

*Определение.* Слоем матриц будем называть совокупность квазиортогональных матриц с известными функциями зависимости значений элементов (уровней) матриц слоя от заданных переменной  $d$  значений порядков.

Матрицы Адамара, Мерсенна и Эйлера, согласно работе [1], образуют слои для  $n = 4k - d$  для  $d = 0, 1, 2$ . Матрицы Ферма такого непрерывного слоя не образуют, поскольку для них функции уровня определены на узком множестве значений  $n = 2^k + 1$  при четных  $k$ .

Как следствие такого подхода к проблеме существования матриц Адамара возникает представление о том, что все названные выше объекты являются проявлением одного математического объекта, данного совокупностью слоев и сечений, — матриц слоев для заданных показателем  $k$  значений порядков. Нахождение любой матрицы сечения автоматически влечет за собой нахождение всех остальных, поскольку они от-

ражают одно и то же: матрицы сечения взаимно зависимы.

Частное сечение может быть расширено матрицами Ферма по тому же принципу — с их помощью можно находить соответствующие им матрицы Адамара на единицу меньших порядков. Представление о менее крупных, чем слои и сечения, объединениях матриц возникло еще в работе [7] благодаря тому, что алгоритм удвоения порядка Сильвестра может быть применен к любой матрице Адамара, в том числе и к вновь найденным, использованием конструкций Пэли. При этом образуется новая ветвь матриц Адамара, не пересекающаяся с предыдущими матрицами.

Замечание Пэли делает интересным изучение и отдельных артефактных матриц семейства Адамара, в том числе матриц золотого сечения, рассматриваемых в данной работе.

### Модульно двухуровневые матрицы

Исследование отдельных квазиортогональных матриц порядков  $n = 4k - d$ , где  $d = 0, 1, 2$ , показало, что при понижении значения  $n$  на единицу ортогональность столбцов матрицы сохраняется при увеличении количества уровней: матрицы Адамара — одноуровневые по модулю их элементов, матрицы Мерсенна — двухуровневые, матрицы Эйлера — четырехуровневые (с учетом знака).

Матрицы Адамара начинают и исчерпывают собой совокупность одноуровневых матриц. Связанные с ними взаимно однозначным соответствием матрицы Мерсенна и Эйлера наследуют свойство иметь минимальное число уровней, гарантирующее их существование в пределах выделенного им порядка [1]. Например, трехуровневые матрицы Белевича (С-матрицы) [8] определены на значениях порядков, разделяемых с матрицами Эйлера, и имеют количество уровней на единицу меньше, чем у них. Это не гарантирует их существование, их нет для значений  $n=4k-2$ , если число  $n-1$  не разложимо в сумму двух квадратов целых чисел.

Напомним, что матрица Эйлера  $E_n$  [5] — это квадратная матрица порядка  $n=4k-2$  с элементами  $\{1, -1, b, -b\}$  такая, что  $E_n^T E_n = \xi I_n$ . Здесь

$$I_n \text{ — единичная матрица; } \xi = \frac{(n+2) + (n-2)b^2}{2},$$

причем  $b = \frac{1}{2}$  при  $n=6$ , в остальных случаях

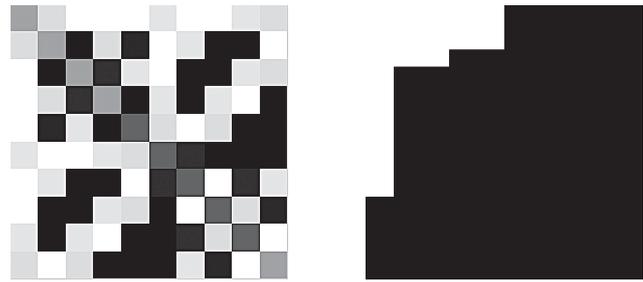
$$b = \frac{q - \sqrt{8q}}{q-8}, \text{ где } q = n+2.$$

Матрицы Эйлера, как и матрицы Мерсенна, модульно двухуровневые и представляют самостоятельный интерес как переходная форма к матрицам Мерсенна и Ферма. Так как они не связаны непосредственно с не менее актуальными в этой теории матрицами Белевича, возникает вопрос о существовании иных модульно двухуровневых матриц, лучше отражающих эту взаимосвязь.

### Континуальные матрицы

Континуальные матрицы отличаются от матриц слоев семейства Адамара тем, что их функции уровней зависят более чем от одного аргумента — порядка  $n$ . Поэтому для каждого  $n$  они порождают не одну, а континуальное множество квазиортогональных матриц, описываемое некоторой параметрической зависимостью.

Хотя это понятие не востребовалось ранее, возможность такого построения следует из интерпретации матриц как таблиц проекций векторов ортогонального базиса, свободно разворачиваемого для минимизации, например, модуля максимального уровня матрицы в целях повышения ее детерминанта. С изучения именно таких задач началась история матриц рассматриваемого семейства [2], слои которого представляют собой оптимальные или субоптимальные решения — М-матрицы [9]. В качестве примера приведена континуальная модульно четырехуровневая матрица десятого порядка  $M_{10}$  (рис. 1). Яркость клетки отражает величину уровня ее

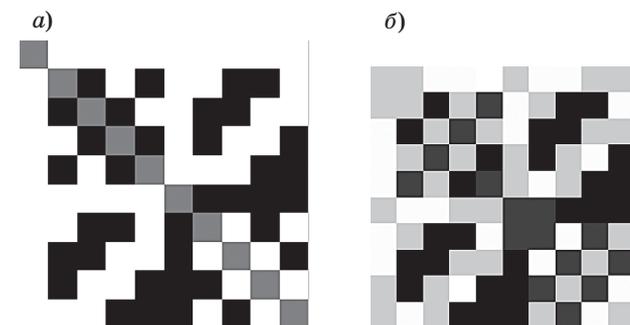


■ Рис. 1. Портрет континуальной матрицы  $M_{10}$  и гистограмма модулей ее элементов

элемента в пределах от 0 (белый цвет) до 1 (черный цвет).

Среди четырех модулей ее уровней, обозначим их как  $a \geq b \geq c \geq g$ , верхний уровень задан ( $a=1$ ), а второй и третий зависят от нижнего уровня  $g$ , элементы которого расположены на диагонали как  $b^2 + 2(b-1) + 2(g-c) + c^2 = 0$ ,  $c = 1/(g+1)$ . Матрица заведомо многоуровневая и примечательна лишь двумя своими крайними решениями. Одним крайним решением является матрица Белевича  $C_{10}$  (рис. 2, а), поскольку при  $g=0$  имеем  $b=1, c=1, a=1$ . Второе крайнее решение (рис. 2, б) назовем матрицей золотого сечения  $G_{10}$ , поскольку при  $b=c=g < a=1$

$$G_{10} = \begin{pmatrix} g & g & a & a & a & g & a & a & g & g \\ g & g & -a & g & -g & a & g & -a & -a & a \\ a & -a & g & -g & g & a & -a & -a & g & g \\ a & g & -g & g & -a & g & -a & g & a & -a \\ a & -g & g & -a & -g & g & a & g & -a & -a \\ g & a & a & g & g & -g & -g & -a & -a & -a \\ a & g & -a & -a & a & -g & -g & a & -g & g \\ a & -a & -a & g & g & -a & a & -g & g & -g \\ g & -a & g & a & -a & -a & -g & g & -g & a \\ g & a & g & -a & -a & -a & g & -g & a & g \end{pmatrix}.$$



■ Рис. 2. Портреты матриц Белевича  $C_{10}$  (а) и золотого сечения  $G_{10}$  (б)

Она отличается условием  $g^2 + g - 1 = 0$ , дающим иррациональное значение нижнего уровня — обратно пропорциональное значению золотой пропорции 1,618.. в теории чисел Фибоначчи.

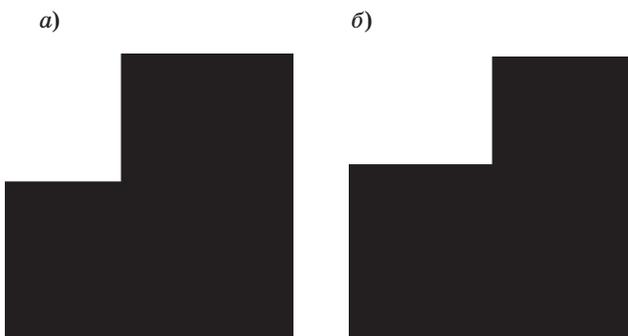
Раймонд Пэли построил теорию матриц Адамара на свойствах матриц символов Лежандра конечных полей Галуа [7]. Матрица Белевича десятого порядка находится при помощи квадратичных вычетов чисел  $0, 1, -1, g, g+1, g-1, -g, -g+1, -g-1$ , где  $g$  — корень неприводимого к простым множителям многочлена  $g^2 + g - 1 = 0$ . Им отвечают символы Лежандра  $x=[0, 1, 1]$ ,  $y=[-1, -1, 1]$ ,  $z=[-1, 1, -1]$ , сгруппированные в стартовые векторы трех симметричных циклических блоков  $X, Y, Z$  искомой матрицы

$$C_{10} = \begin{pmatrix} 0 & e^T & e^T & e^T \\ e & X & Z & Y \\ e & Y & X & Z \\ e & Z & Y & X \end{pmatrix},$$

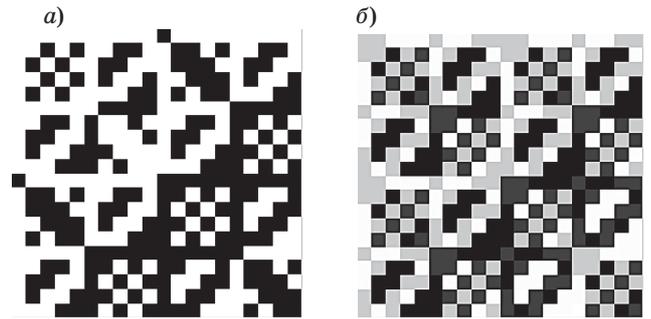
где  $e$  — вектор единичных элементов каймы. Как видно, десятый порядок так или иначе связан с золотым сечением.

### Ветвь матриц золотого сечения

Представленные гистограммы модулей элементов матрицы Эйлера  $E_{10}$  (рис. 3, а) и матрицы  $G_{10}$  (рис. 3, б) близки по содержанию — и та и другая являются модульно двухуровневыми матрицами. Вместе с тем это матрицы, существенно отличающиеся друг от друга. Очевидно, что если бы слой матриц золотого сечения, частным представителем которого является  $G_{10}$ , сосуществовал на порядках  $n = 4k - 2$  матриц Эйлера и был связан с ними некоторым соотношением, это означало бы решение проблемы нахождения матриц Белевича и связанных с ними матриц Адамара. То, что



■ Рис. 3. Гистограммы распределения модулей элементов матриц Эйлера  $E_{10}$  (а) и золотого сечения  $G_{10}$  (б)



■ Рис. 4. Портреты матриц Адамара  $H_{20}$  (а) и золотого сечения  $G_{20}$  (б)

матрицы Белевича существуют не всегда, противоречит столь простому заключению.

Следовательно, ветвь матриц золотого сечения определена на других порядках  $n = 10 \cdot 2^k$ . Для них справедлива та же логика построения, что и для матриц Адамара: матрица  $G_{10}$  является стартовой для всей последовательности, находимой итерациями, представимыми в виде

$$G_{n_{k+1}} = \begin{pmatrix} G_{n_k} & G_{n_k} \\ G_{n_k} & -G_{n_k} \end{pmatrix}.$$

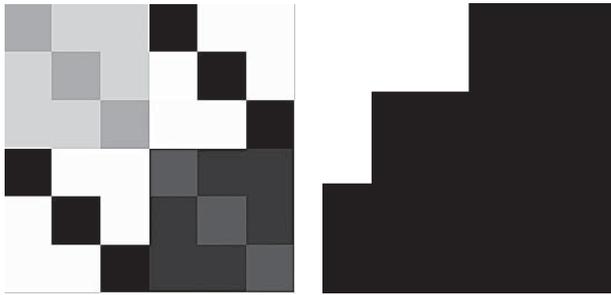
Значение функции уровня матриц этой ветви, как и у матриц Адамара, — константа, в данном случае равная  $g$ . Отсюда следует вывод, что ветви матриц золотого сечения и матриц Адамара являются двумя крайними решениями соответствующих им по порядкам континуальных матриц (рис. 4, а, б).

### Удвоение ветви матриц золотого сечения

Построение ветви модульно двухуровневых матриц, связанных с матрицей Белевича, поднимает вопрос о поиске подобных конструкций не только для десятого порядка. Примеры матриц Ферма и свойства самих матриц Белевича показывают, что едва ли чисто количественно они перерастут в слой. Тем не менее, изучать порядки, близко расположенные к десятому, несложно. Пока получается следующий ответ на поставленный существованием матриц золотого сечения вопрос.

Исследование показало, что на ближайших шестом и четырнадцатом порядках имеются модульно двухуровневые матрицы, не совпадающие с матрицами Эйлера. При этом только у матрицы шестого порядка наблюдается ровно такое же соотношение числа рациональных и иррациональных элементов, как у матриц золотого сечения, — 50/50 %.

Модульно трехуровневая матрица с уровнями  $a \geq b \geq c$  показана на рис. 5. Верхний уровень задан



■ **Рис. 5.** Портрет континуальной матрицы  $M_6$  и гистограмма модулей ее элементов

( $a=1$ ), а второй зависит от нижнего уровня  $c$ , элементы которого расположены на диагонали как  $b^2+2bc-1=0$ . При  $c=0$  это матрица Белевича шестого порядка. Решение  $b=g$  достигается уже при  $c=1/2$ , но оно не является краевым. Полный аналог матрицы золотого сечения (краевое решение) получаем при  $c=b$ , откуда несложно выводится

$$c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0,577... < g. \text{ У последующих за десятком}$$

порядком матриц он может быть только больше. Эта ветвь порождает матрицу Адамара  $H_{12}$ .

### Заключение

В настоящей работе приведена матрица золотого сечения и исследованы те ветви, которые она или близкие к ней матрицы порождают. Показано, что с этими матрицами тесно связаны матрицы Белевича и Адамара, их специфические структуры и алгоритмы их нахождения. Это расширяет представление о модульно двухуровневых матрицах Мерсенна [3] и Эйлера [5]. Обращает на себя внимание, что порядки  $n=10 \cdot 2^k$ , для которых G-матрицы существуют, занимают особое место в алгоритмах обработки изображений, это значения 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 и т. п.

Область приложения математических моделей в виде компактных в точном математическом смысле базисов велика [9]. Любопытна идея использования в качестве модели фазовых превращений — кристаллизации охлаждаемых сплавов — континуальной матрицы с ее особыми краевыми точками, способными объяснить наблюдаемые из опыта закономерности [10, 11]. Для упорядоченных структур, состоящих из двух бесконечно повторяющихся фрагментов, такой моделью, отражающей детали строения, может являться модульно двухуровневая матрица золотого сечения. Здесь просматриваются одни и те же особенности решаемой задачи —

дихотомия элементов, связанная с золотой пропорцией [12]. Интерес состоит не столько в констатации этой, безусловно, важной зависимости, сколько в указании перспектив: ведь и материалы, и матрицы в состоянии иметь еще и другие виды, причем вторые могут привлекаться для предсказания существования и затем для анализа первых [13, 14].

### Литература

1. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5. С. 2–8.
2. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux déterminants // Bulletin des Sciences Mathématiques. 1893. Vol. 17. P. 240–246.
3. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 92–94.
4. Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 89–90.
5. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 7–10.
6. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 90–93.
7. Paley R.E.A.C. On orthogonal matrices // J. of Mathematics and Physics. 1933. Vol. 12. P. 311–320.
8. Belevitch V. Theorem of 2n-terminal networks with application to conference telephony // Electr. Commun. 1950. Vol. 26. P. 231–244.
9. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. M-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14–21.
10. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry // Physical Review Letters. 1984. Vol. 53. P. 1951–1954.
11. Комаров С. М. Кристалл сомнения // Химия и жизнь. 2011. № 12. [http://elementy.ru/lib/431491?page\\_design=print](http://elementy.ru/lib/431491?page_design=print) (дата обращения: 07.07.2013).
12. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. M-матрицы и кристаллические структуры // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2013. № 3. С. 58–62.
13. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. Алгоритм и программа поиска и исследования M-матриц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3. С. 82–86.
14. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. M-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 87–90.

УДК 004.93+62.51+625.03

## АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПОМОЩЬЮ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

**Д. Е. Обертов**<sup>1</sup>,

аспирант

**В. М. Бардов**<sup>2</sup>,

аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассматриваются проблемы обнаружения транспортных средств с помощью акселерометров. Описан алгоритм для обнаружения транспортных средств и разделения во времени одного автомобиля от другого. Приведены результаты обработки данных с помощью алгоритма и показана его эффективность.

**Ключевые слова** — акселерометр, обнаружение, транспортное средство, интеллектуальные транспортные системы.

### Введение

В настоящее время в разных странах разрабатываются и внедряются интеллектуальные транспортные системы различного назначения.

Масштабная установка в современных транспортных средствах (ТС) систем дорожной безопасности водителей, таких как подушки безопасности, привела к снижению смертности в дорожно-транспортных происшествиях. Например, в США благодаря подушкам безопасности в 2009 г. была спасена жизнь более 28 200 человек [1].

Типичные сценарии, которые часто приводят к серьезным столкновениям, — это левые повороты на перекрестках или обгоны на двухполосной дороге с двусторонним движением [2]. В последней ситуации перспективным средством избежать возникновения аварийных условий является использование «компьютерного помощника», представляющего собой комплекс аппаратных и програм-

мных средств в целях оказания помощи водителю при обгоне [3]. Он использует прогнозируемое время прибытия следующего встречного ТС, основанное на собственной скорости движения, предшествующем и обгоняющем ТС для информирования водителя о том, безопасен или нет обгон.

Аналогичная система дорожного руководства (помощи) основана на определении опасных изменений полос движения с помощью комбинации сигналов, обработанных радаром, и визуальной информации [4]. Отличие этой системы заключается в том, что она умеет среди других сценариев распознавать встречные ТС и предупреждать водителя о смене полосы движения. Однако возможности радара и датчика поля зрения визуальных систем имеют ограничение в диапазоне работы. Определение поворотов, подъемов или даже большие расстояния могут стать проблемой для таких систем.

Другие подходы, преодолевающие эти ограничения, основаны на системах, в которых отдельные ТС обмениваются данными друг с другом, предоставляя водителям взаимную информацию [5, 6]. Недостатками этих подходов, в частности, является то, что каждый автомобиль должен быть оснащен соответствующей системой, и только ограниченная информация об окружении, например состояние дороги, препятствия и направление движения, доступна.

Современные автомобили снабжены высокоинтеллектуальными системами безопасности, но

<sup>1</sup> Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры СУиИ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики *Б. Р. Андриевский*.

<sup>2</sup> Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент кафедры СУиИ Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики *С. В. Арановский*.

не каждый водитель имеет возможность купить такую машину, именно поэтому в развитых странах мира создается интеллектуальная дорожная инфраструктура. Еще один способ сделать дорожное движение безопаснее — это наблюдающаяся в последние годы тенденция к кооперативной инфраструктуре [7—14]. Сейчас существует много проектов, которые направлены на развитие интеллектуальной дорожной инфраструктуры в виде датчиков дорожной разметки, объединенных беспроводной сетью. Датчики обмениваются информацией как между собой, так и с серверами, расположенными за пределами дороги. Идея основана на автономном транспортном и дорожном контроле со стороны каждого датчика.

Датчики крепятся на дорожное покрытие, а точнее, приклеиваются на дорожную разметку специальным клеем, получая питание от солнечных батарей. Датчики могут, например, передать специальные сигналы водителю, поменяв цвет или начав мигать за несколько сотен метров до начала полосы гололеда или какой-то другой критической ситуации. Датчики также могут передавать сигнал близстоящему дорожному знаку, который начнет мигать, предупреждая водителей о необходимости сбросить скорость, сменить полосу движения и т. д.

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) — это системное взаимодействие современных информационных и коммуникационных технологий и средств автоматизации с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и пользователями, которая направлена на повышение безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для водителей и пользователей транспорта [11, 13]. Развитие ИТС основано на системном подходе, т. е. создание ИТС ведется в направлении целостной инфраструктуры, а не отдельных модулей. Формируется единая открытая архитектура системы и протоколы обмена информацией [11—17]. В ИТС используются различные виды беспроводной связи, но широкое применение сейчас нашел стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi) [9—17]. Современные разработки в технологиях встраиваемых систем позволяют использовать операционные системы реального времени, а также более высокоуровневые приложения, дающие возможность применять эти разработки в области искусственного интеллекта.

Однако существует необходимость создания ИТС нового поколения, которая соответствует сценарию инновационного развития. В данном подходе требуется определить характерные параметры ТС. Определение параметров имеет важное значение для выявления транспортных

сценариев, мониторинга движения и использования дороги или прохождения в реальном времени ТС с информацией для водителей.

### Проблемы, стоящие при решении задач ИТС

*Обнаружение ТС и определение числа его осей.* Главными проблемами являются подсчет транспортных средств и определение количества осей каждого ТС, что можно рассматривать как две наиболее важные задачи. Информация о проезжающих автомобилях необходима для мониторинга дорожного движения; подсчет количества осей ТС помогает определять классы ТС и дает информацию, по которой другие параметры движения могут быть оценены.

*Обнаружение прицепа ТС и определение его типа.* Информация о прицепе, соединенном с автомобилем, является существенной для определения класса ТС. Кроме того, обнаружение прицепа, каким-либо образом соединенного с ТС, и определение количества осей ТС с прицепом так, чтобы прицеп не рассматривался в качестве индивидуального ТС, также является важным параметром ТС.

*Скорость и направление движения (курсовой угол) ТС* (рис. 1) служат для определения транспортных сценариев и обеспечения помощи водителю, например, чтобы водитель замедлил скорость автомобиля на повороте, на котором дорожное покрытие затянато льдом, в противном случае текущая скорость может привести ТС к заносу или аварии. Кроме того, курсовой угол может быть полезен при расчете таких намерений водителя, как перестроение или обгон ТС.

*Колесная база ТС.* Объединяя данные по количеству осей ТС и скорость автомобиля, нетрудно рассчитать колесную базу ТС (расстояние между соседними осями ТС) (см. рис. 1), которая является показателем для идентификации класса ТС, например, автобусы легко отличить от легковых автомобилей, определив только расстояние между осями.



■ Рис. 1. Некоторые наиболее важные параметры ТС

*Боковое положение ТС* (см. рис. 1) имеет главнейшее значение для предвидения возможных несчастных случаев или опасных ситуаций. По оценке боковых положений ТС на дороге можно также определить полосу движения, в которой находится ТС, или изменение водителем полосы движения. Обладая этой информацией, можно, например, прогнозировать аварии и опасные маневры обгона.

*Нагрузка на ось ТС* также является параметром для определения классов автомобилей. В соответствии с нагрузкой на ось легко отличить тяжелые ТС от легких. Данная информация может быть необходимой, когда речь заходит о прогнозировании нарушения дистанции движения с целью избежать столкновения или просто предупреждении водителя о малом расстоянии между ТС. Кроме того, нагрузка на ось — значимый параметр для определения перегруженных ТС, которые слишком тяжелы для конкретной дороги. В рамках ремонта дорог нагрузка на ось также интересна — по ней можно отследить износ дороги.

*Определение классов ТС* производится по нескольким различным критериям для различных приложений и целей. Наиболее очевидным применением, конечно, является мониторинг и статистика описания движения транспорта в одной определенной точке. Еще одно приложение, также по безопасности дорожного движения, — фильтрация запрещенных ТС.

Рассмотрим пример, в котором мост предназначен только для легких ТС, не превышающих определенного веса. Тяжелый грузовик, игнорируя это ограничение, продолжает движение по мосту, в результате чего мост, скорее всего, обрушится. Транспортная инфраструктура, обладая информацией о классе ТС, может заблаговременно предупредить водителя грузовика не продолжать дальнейшее движение. Разумный, с точки зрения безопасности дорожного движения, набор классов для автомобилей включает легковые автомобили, легкие грузовики, тяжелые грузовики, грузовики с одним или несколькими прицепами и легковые автомобили с прицепом [18].

### Мотивация для разработки алгоритма

Есть много систем, доступных для транспортного мониторинга и определения ТС. Индуктивные петли, например, обычно применяют для подсчета ТС и при использовании в парах, а также для оценки скорости [19—21]. Недостатком петель является необходимость перекрывать движение транспорта при монтаже датчиков. Индуктивные петли не могут быть развернуты в больших масштабах, так как это очень дорого, занимает много времени и датчики сами по себе

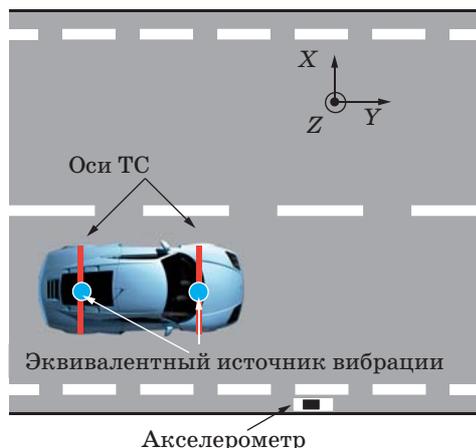
имеют слишком короткий срок службы из-за прямого воздействия ТС [20, 21]. Некоторые из проблем индуктивных петель могут быть преодолены с помощью применения других видов датчиков: видеокамер, инфракрасных, микроволновых и ультразвуковых радаров [21]. Такие датчики можно установить вдоль дорог легко, не приводя к нарушению дорожного движения во время установки. Однако для таких систем нужна большая вычислительная мощность и, следовательно, они слишком дорогие для широкомаштабного развертывания [18—21].

Перспективным подходом является использование магнитометров для обнаружения ТС — в этой области проведено много исследований [7, 8, 10, 22, 23]. Магнитометры дешевы, менее восприимчивы, чем индуктивные петли, к влиянию движения, их можно изготовить в больших количествах и использовать там, где индуктивные петли использовать невозможно, например на мостах [21].

Недостатками магнитометров является то, что они имеют возможность только обнаруживать ТС и делать основную простую идентификацию классов транспортных средств. Для оценки более сложных параметров, таких как скорость ТС, необходимо, по крайней мере, два таких датчика, которые должны быть идеально синхронизированы [7—22]. Есть методы определения скорости ТС с одним магнитометром, но точность их недостаточно высока.

Для преодоления этих ограничений авторами данной статьи был выбран другой подход. Вибрации дорожного покрытия, вызванные ТС, могут нести больше информации, чем отклонения магнитного поля Земли, измеряемые индуктивными петлями или магнитометрами. Электронные акселерометры малых размеров могут быть спроектированы таким же образом, как и магнитометры [18, 24].

Малые встраиваемые системы похожи на системы с магнитометрами, упомянутыми выше. Они могут быть развернуты быстро и в больших масштабах, например, на стороне дороги. Проведено несколько исследований по влиянию транспорта на дорожное покрытие [14—17]. Однако лишь минимальные выводы были сделаны, чтобы связать вибрации транспорта с оценкой параметров движения. В работах [17, 23] дается более развернутое исследование акселерометров, но имеется ограничение в разработанных алгоритмах обнаружения и подсчета количества ТС [18, 24]. Проблема подхода этих алгоритмов заключается в том, что в них используется априори информация о количестве осей ТС, которая не дает возможности практически применять рассматриваемые алгоритмы.



■ Рис. 2. Эквивалентный источник вибрации

Настоящая работа предназначена для решения проблемы обнаружения ТС, подсчета количества их осей и восполнения пробела в теоретической информации о дорожных вибрациях, вызванных проезжающими ТС.

**Реализация алгоритма**

Общим и простым предположением при рассмотрении ТС, движущегося вдоль дороги, является, что каждая колесная пара (ось) вызывает вибрацию, распространяющуюся в асфальте как волна. Поэтому для ТС с  $M$  осями вибрации можно рассматривать как происходящие из  $M$  эквивалентных источников (рис. 2).

Соответственно, вибрации, происходящие от различных осей, достигают датчика с задержкой  $\Delta t$  в зависимости от колесной базы  $b$  (пространственное разделение источников) и скорости ТС  $V$ . Отметим, что двойственность между колесной базой и скоростью существует:

$$\Delta t = b/V. \tag{1}$$

Модель вибрационной характеристики одной оси (рис. 3, а) можно описать импульсом  $p_i(t)$ , имеющим определенную амплитуду и ширину. Форма импульса может быть представлена гауссовой кривой [18]

$$p_i(t) = A_i \exp\left(-a_i(t - t_i)^2 / 2\right), \tag{2}$$

где  $A_i = 1$ ;  $a_i = 2$ ;  $t_i = 5$ .

Данные параметры импульса определяют ширину, амплитуду и смещение импульса от начала координат.

Для ТС, которое имеет  $n$  осей, модель может быть представлена как суперпозиция импульсов  $p_i(t)$ :

$$Ml(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t). \tag{3}$$

Например, модель легкового автомобиля с параметрами  $n=2$ ,  $A_1=2$ ,  $a_1=2$ ,  $t_1=3$ ,  $A_2=1$ ,  $a_2=6$ ,  $t_2=5$  представлена на рис. 3, б.

Также модель требует учета помех  $n(t)$  (рис. 4):

$$M(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) + n(t), \tag{4}$$

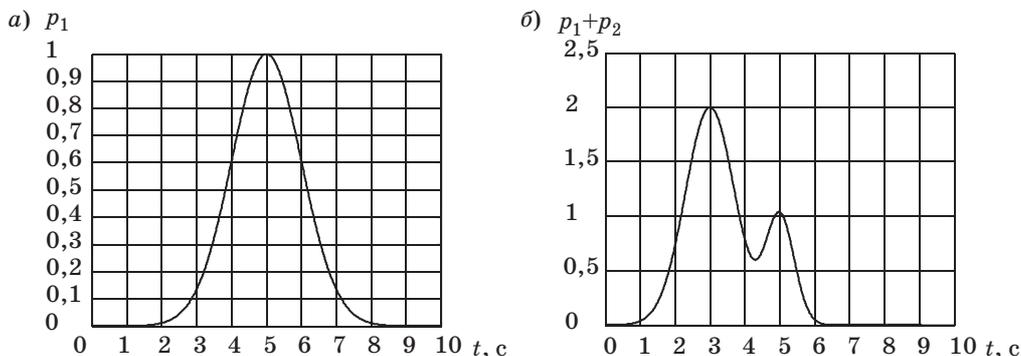
$n(t)$  может быть представлена как квадрат белого гауссова шума.

Если временной интервал  $\Delta t$  умножить на скорость автомобиля  $V$ , мы получим колесную базу — расстояние между соседними осями

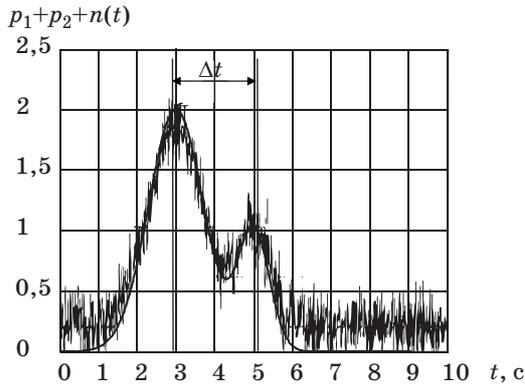
$$W = V\Delta t. \tag{5}$$

Мы будем использовать эту математическую модель вибрационной характеристики для разработки алгоритма обнаружения ТС и подсчета количества осей ТС. Эта модель — первый шаг для описания алгоритма.

Алгоритм обнаружения ТС показан на рис. 5. Он осуществляется согласно представленным шагам.



■ Рис. 3. Модель вибрационной характеристики одной оси  $p_i(t)$  (а) и легкового автомобиля (б)



■ Рис. 4. Характерный график вибрационной характеристики легкового автомобиля с помехами

Мощность сигнала  $w[n]$  есть квадрат сигнала после полосового фильтра. Рассмотрим сглаживание скользящим окном подробнее. Сигнал энергии оценивается локально путем интегрирования мощности сигнала в течение последних  $K$  образцов (сглаживанием скользящим окном). В результате кривую назовем энергией  $s[n]$ . Интеграл вычисляется с помощью кумулятивных сумм вида

$$s[n] = \sum_{i=0}^{K-1} w[n-i] = \dots s[n-1] + w[n] - w[n-K]. \quad (6)$$

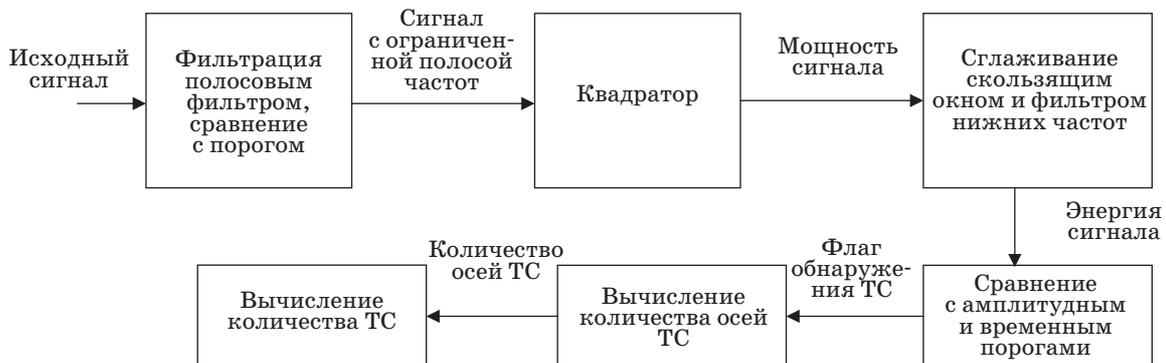
В связи с ограниченной длиной от суммы (6) поток вернется к энергетическому уровню шума после определенного времени бездействия.

Таким образом, количество шагов интегрирования (суммирования)  $K$  имеет решающее значение. Малая величина  $K$  даст очень точную оценку энергии, но чувствительную к помехам, в то время как высокие значения являются более надежными, но их точность оказывается ниже.

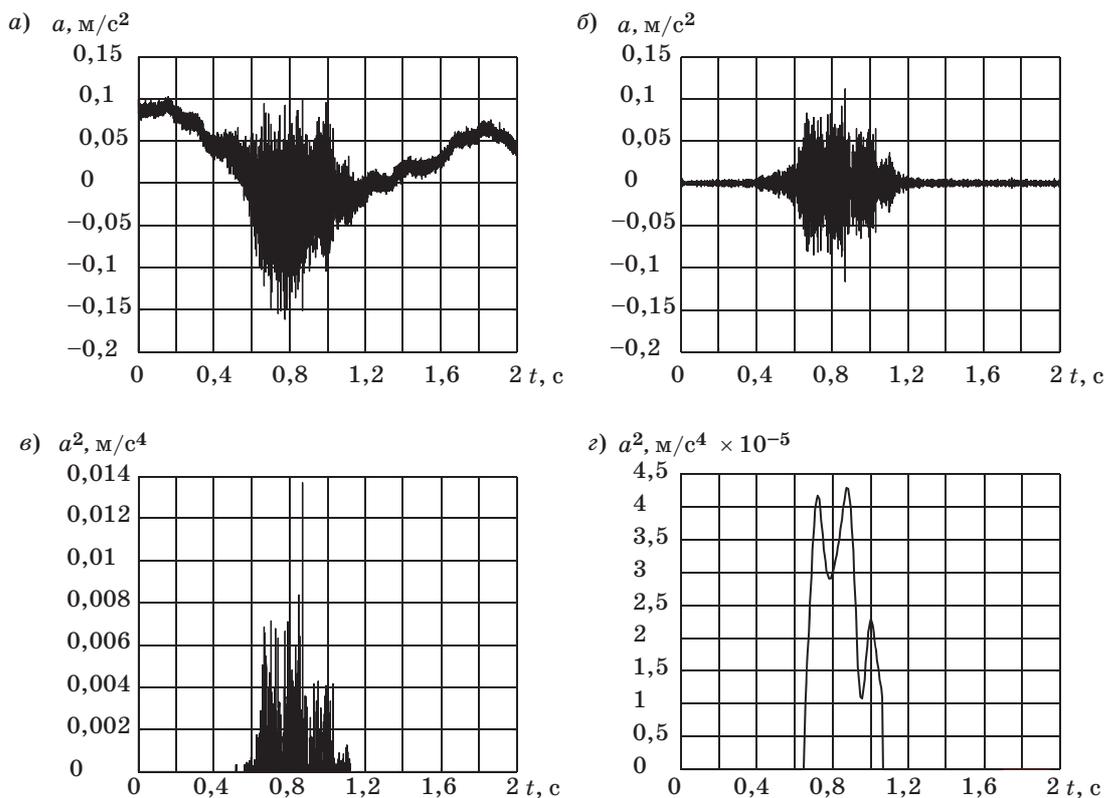
Измеряемый сигнал предварительно фильтруется, возводится в квадрат и сглаживается скользящим окном и фильтром нижних частот для расчета энергии. На рис. 6, а—г показан пример обнаружения легкового автомобиля с прицепом. Количество осей может быть найдено очень легко по рис. 6, г путем анализа производной сигнала, т. е. нахождением количества максимумов сигнала.

Энергетическая оценка затем используется для обнаружения изменений в энергии, т. е. повышение уровня энергии предполагает более высокую сейсмическую активность, ориентировочно вызванную ТС. Наиболее простой путь для обнаружения ТС — считать отрезки, когда энергия превышает амплитудный порог  $G$ . Однако амплитудного порога самого по себе недостаточно, поскольку он также создает определенные проблемы. Если мы изучаем автомобиль с длинной колесной базой (или, наоборот, низкой скоростью), поток энергии может уменьшиться ниже порога после первой оси, а затем превысить порог снова, когда энергия увеличится за счет второй оси. Чтобы избежать ложных сигналов тревоги, в таких случаях вводится временной порог  $T_G$  [18—20]. Пока разница во времени между последним превышением порога  $t_{last}$  и текущим временем  $t$  меньше, чем временной порог  $T_G$ , предполагается, что любое превышение порога обусловлено этим же ТС (рис. 7).

Выбор двух параметров (амплитудного  $G$  и временного  $T_G$  порогов) имеет решающее значение и напрямую влияет на вероятность ложного обнаружения и ошибок. Низкопороговое решение позволяет обнаруживать ТС, которые имеют только низкий уровень энергии, но повышает вероятность ложного обнаружения в связи с другими сейсмическими возмущениями или наличием ТС в соседних полосах в то же время [18—20]. Высокопороговое решение, очевидно, уменьша-



■ Рис. 5. Последовательность действий по обнаружению и подсчету количества ТС



■ **Рис. 6.** Пример обнаружения ТС и определения количества осей (легковой автомобиль с прицепом,  $V=22$  м/с): *a* — исходный сигнал; *b* — сигнал после полосового эллиптического фильтра; *c* — после возведения в квадрат; *z* — после сглаживания скользящим средним и фильтром нижних частот

ет вероятность ложного обнаружения ТС, но не позволяет обнаруживать некоторые ТС.

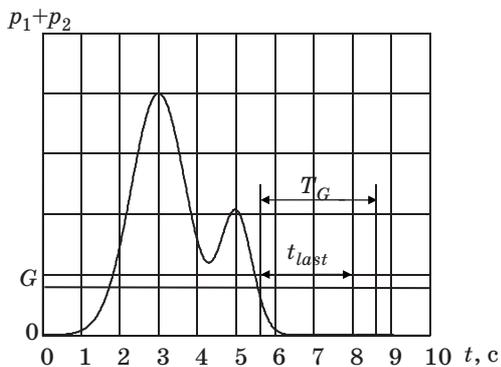
Амплитудный порог следует рассчитывать исходя из желаемой вероятности обнаружения ТС (99,9 %).

Второй параметр — временной порог — определяет, какая должна быть минимальная разница во времени между двумя ТС в ряду. Небольшой временной порог дает обнаружение ТС

с короткими интервалами следования, но увеличивает вероятность ложного обнаружения в связи с многочисленными обнаружениями одного и того же ТС. Долгий временной порог, с другой стороны, снижает частоту ложных обнаружений, но увеличивает количество пропущенных (необнаруженных) ТС.

Идеальная длительность временного порога зависит от скорости ТС и расстояния между соседними ТС. Предположим, средний грузовик с колесной базой 8 м со скоростью 20 м/с движется по дороге. Проезд мимо датчика займет 0,4 с для обеих осей. По дороге с более низкой предельной скоростью или во время пробок на дорогах у того же грузовика со скоростью 8 м/с это займет 1 с. Далее предположим, что автомобиль, идущий после грузовика с той же скоростью, применил трехсекундное правило [15, 16, 18]. Фиксированная величина временного порога в 1 с может быть незначительно изменена в обоих случаях, и даже может быть увеличена до 1,5 с для того, чтобы увеличить надежность.

Пересмотрим расстояние между двумя ТС: временной интервал в 3 с дает расстояние 60 м в первом сценарии и 24 м во втором. Это достаточно большие расстояния безопасности, и мож-



■ **Рис. 7.** Иллюстрация параметров алгоритма обнаружения ТС

но предположить, что они нарушаются довольно часто. Особенно при низкой скорости расстояние всего в несколько метров является обычным, и проблема становится очевидной. В то время как временной порог должен быть увеличен, когда скорость уменьшается, расстояние между ТС также снижается, что, с другой стороны, требует более короткого временного порога. Очевидно, что увеличивается либо вероятность ложного обнаружения, либо вероятность ошибки.

## Результаты

Авторами данной работы в мае 2011 г. в окрестностях города Лулео (Швеция) было обнаружено 138 из 140 ТС. Один из 140 автомобилей обнаружен не был и выявлено одно ложное обнаружение. На первый взгляд, можно было бы подумать, что алгоритм работает гораздо хуже, чем ожидалось. Тем не менее, размер выборки  $N=140$  дает очень низкий уровень доверия, и надежный процент ошибок не может быть рассчитан. Анализируя ошибку, можно сделать более разумный вывод.

Во-первых, амплитудный порог немного превышал значение энергии сигнала легкового автомобиля. Порог может быть снижен незначительно, но стоит отметить, что тогда повышается вероятность ложного обнаружения.

Во-вторых, после того как грузовик с прицепом прошел, еще несколько вибраций были зафиксированы. Причина такого рода ошибок неизвестна, но, скорее всего, связана с качеством дорожного покрытия и нелинейностью измерений.

Подход к решению этой проблемы заключается в использовании адаптивного временного порога [25] в зависимости от измеряемой энергии

и количества осей. Водители, как правило, держатся от грузовиков дальше безопасного расстояния, — это может быть правильным подходом. Другая возможность состоит в изменении решения, что автомобиль прошел только после того, как порог был превышен в течение определенного времени, по аналогии с алгоритмом, предложенным в работах [10, 16].

## Заключение

Оценка основных параметров ТС — обнаружение транспортных средств и подсчет количества осей ТС — с помощью измерения вибраций дорожного покрытия возможна. Обнаружение ТС можно обеспечить с большой надежностью. Представленный алгоритм показал хорошую производительность на экспериментальных данных. Особые случаи, а именно ошибки (ложное определение и промах), проанализированы, и предложены меры по преодолению проблемы.

Результаты подтверждают, что по второму алгоритму — оценки осей — можно определять параметры ТС с различным числом осей.

Кроме того, было показано, что с еще одним параметром — скоростью автомобиля — легко вычисляется колесная база ТС. По колесной базе можно делать полноценную идентификацию классов ТС, что является вопросом других исследований.

Данная статья имеет преемственность с тремя другими статьями авторов по этой тематике [26—28].

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы (соглашение № 14.В37.21.0406).

## Литература

1. National Highway Traffic Safety Administration. Counts for frontal air bag related fatalities and seriously injured persons. Jan. 2008. P. 1–15. <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/AB0108.pdf> (дата обращения: 10.08.2013).
2. National Highway Traffic Safety Administration. Fatality Analysis Reporting System Database. 2008. P. 5–17. <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/AB0108.pdf> (дата обращения: 10.08.2013).
3. Hegeman G., R. van der Horst, Brookhuis K. A., Hoogendoorn S. P. Functioning and acceptance of overtaking assistant design tested in driving simulator experiment // J. of the Transportation Research Board. 2007. Vol. 2018. P. 45–52.
4. Eidehall A., Pohl J., Gustafsson F., Ekmark J. Toward autonomous collision avoidance by steering // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Mar. 2007. Vol. 8. P. 84–94.
5. CAR 2 CAR Communication Consortium. Mission and objectives. Project Website. July 2009. P. 1–25. <http://www.car-to-car.org>. (дата обращения: 10.08.2013).
6. Robinson C. et al. Efficient message composition and coding for cooperative vehicular safety applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. Nov. 2007. Vol. 56. P. 3244–3255.
7. Isaksson M. Vehicle detection using anisotropic magnetoresistors // Master's thesis. Chalmers University of Technology, 2008. P. 1–45.
8. Sullivan J. M., Winkler C. B., Hagan M. R. Smart barrel for an adaptive queue-warning system // Tech. Rep. University of Michigan. Febr. 2005. P. 15–52.

9. **Misener J., Shladover S.** PATH investigations in vehicle-roadside cooperation and safety: A foundation for safety and vehicle-infrastructure integration research // IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. (ITSC'06). 2006. P. 9–16.
10. **Coleri S., Cheung S. Y., Varaiya P.** Sensor networks for monitoring traffic // 42th Annual Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing. Aug. 2004. P. 1–7.
11. **Birk W., Osipov E.** On the design of cooperative road infrastructure systems // Reglermote. June 2008. P. 349–355.
12. **Hostettler R., Birk W., Lundberg Nordenvaad M.** Surface mounted vehicle property sensing for cooperative vehicle infrastructure systems // Proc. of the 16th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), Scientific Session Final Papers, 2009. P. 1–8.
13. **Birk W., Osipov E., Eliasson J.** iRoad – cooperative road infrastructure systems for driver support // Proc. of the 16th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), Scientific Session Final Papers, 2009. P. 51–55.
14. **iRoad** – A research project at Luleå University of Technology. <http://www.iroad.se>. (дата обращения: 10.08.2013).
15. **Crispino M., D'Apuzzo.** Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building // J. of Sound and Vibration. 2001. Vol. 246. N 2. P. 319–335.
16. **Gramner K., Qvarnstrom R., Aberg T.** iRoad – Project in Embedded Systems // Tech. Rep. Lulea University of Technology. 2009. P. 1–35.
17. **Clemente P., Rinaldis D.** Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1998. Vol. 17. N 5. P. 289–296.
18. **Hostettler R.** Traffic Counting Using Measurements of Road Surface Vibrations // Master's thesis. Lulea University of Technology, 2009. P. 1–48.
19. **Cheung S. U., Varaiya P.** Traffic Surveillance by Wireless Sensor Networks: Final Report // California PATH Research Report. 2007. P. 1–52.
20. **Luz E., Mimbela Y., Klein L. A.** A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems // Federal Highway Administration's (FHWA) Intelligent Transportation Systems Program Office. Aug. 2007. P. 1–25.
21. **Lawrence A. Klein, Milton K. Mills, David R. P. Gibson.** Traffic Detector Handbook. Third ed. // FHWA-HRT-06-108. Oct. 2006. Vol. I. P. 1–5.
22. **Hostettler R., Birk W., Nordenvaad L. M.** On the Feasibility of Road Vibrations-based Vehicle Property Sensing // Proc. of the World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS). 2010. P. 356–364.
23. **Cheung S. U. et al.** Traffic Measurement and Vehicle Classification with a Single Magnetic Sensor // PATH Report UCB-ITS-PWP-2004-07. 2004. P. 1–43.
24. **Cheung S. U., Ergen S. C., Varaiya P.** Traffic Surveillance with Wireless Magnetic Sensors // Proc. of the 12th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS). 2005. P. 1–13.
25. **Hostettler R., Birk W.** Analysis of the Adaptive Threshold Vehicle Detection Algorithm Applied to Traffic Vibrations // IFAC World Congress. 2011. P. 1–6.
26. **Бардов В. М., Обертов Д. Е.** Оценивание скорости транспортных средств с использованием магнитометра // Информационно-управляющие системы. 2013. № 4(65). С. 21–26.
27. **Обертов Д. Е., Бардов В. М.** Алгоритм идентификации классов транспортных средств с помощью акселерометров // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5(60). С. 15–18.
28. **Обертов Д. Е.** Спектральный анализ данных с акселерометров для задач обнаружения и идентификации транспортных средств // Научно-технический вестник ИТМО. 2012. № 6(8). С. 44–50.

УДК 623.746.07519

## КЛЮЧЕВЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА МАЛОРАЗМЕРНЫЕ СУДА

**Ю. Ф. Подоплёкин,**

доктор техн. наук, профессор

**С. Н. Шаров,**

доктор техн. наук, профессор

ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург

Приводится обзор основных теоретических вопросов проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда. Рассматривается способ посадки беспилотных летательных аппаратов на кран-балку, выдвинутую за борт движущегося судна. Обсуждаются траектории их возврата на судно-носитель и особенности приведения его на зацеп кран-балки. Показаны способы управления посадкой в условиях качки судна.

**Ключевые слова** — беспилотный летательный аппарат, информационно-управляющая система, судно.

### Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в таких сферах как дистанционное зондирование земли, контроль коммуникаций и границ, ретрансляция сигналов, экологический мониторинг снижает себестоимость услуг на порядок и даже больше по сравнению с традиционными космическими или авиационными системами. Прогрессу гражданских систем способствует миниатюризация и удешевление электронных компонентов бортового оборудования.

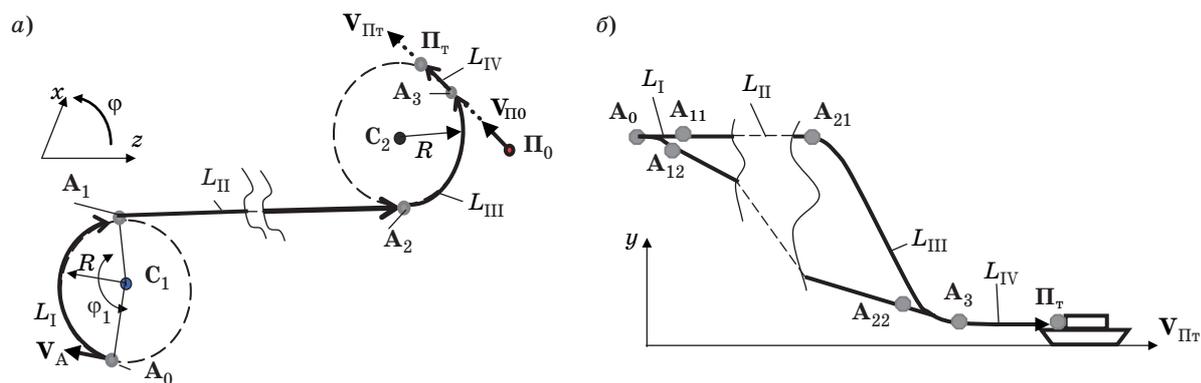
Сравнение БПЛА самолетного и вертолетного типов (тип двигателя, запас топлива, полезная нагрузка) показало ряд преимуществ БПЛА самолетного типа: больший радиус действия; большее время полета; лучшие аэродинамические показатели; больший коэффициент полезной нагрузки.

Однако БПЛА вертолетного типа имеют другое серьезное преимущество, заключающееся в их возможности совершать посадку на площадки ограниченных размеров, что не способны осуществить БПЛА самолетного типа. Возможность размещения и применения многоцелевых комплексов БПЛА на судах малого водоизмещения реализуется только тогда, когда решен вопрос обеспечения их безопасной посадки.

### Сравнительный анализ способов посадки

Вследствие уникальных эксплуатационных и технических особенностей, с которыми сталкивается флот при использовании БПЛА на судах гражданского назначения, не приспособленных для посадки летательных аппаратов, немаловажное значение имеет поиск разработчиком судна проектных решений, обеспечивающих возможность размещения на судне требуемых средств посадки. Например, обеспечение взлетно-посадочной полосы, на которую непосредственно осуществляется посадка с последующим пробегом и торможением. Однако решение этого вопроса в большинстве случаев связано с необходимостью значительного изменения внешней архитектуры судна (изменения положения надстроек, навигационного оборудования, средств погрузки и т. д.) в целях поиска необходимых площадей. Это не всегда является возможным и приемлемым для проектанта судна в связи с вероятными существенными изменениями некоторых его эксплуатационных и технических характеристик.

Наиболее трудной проблемой является посадка «сухим» методом, — в отличие от спуска аппарата на парашюте и посадки на воду, после которой необходим восстановительный ремонт аппарата в результате коррозии от воздействия



■ Рис. 1. Типовые траектории возвращения БПЛА в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскости

соленой воды, что связано со значительными расходами. В связи с этим отрабатываются различные методы посадки БПЛА на палубу судна (некоторые из них основаны на способах, разработанных для посадки БПЛА на сушу): посадка БПЛА в вертикальную сеть, с использованием крыла-парашюта и подхватом штангой, укрепленной на вертикальном шесте на борту судна, и др. [1].

Использование БПЛА на судах и кораблях сдерживается единственной причиной — отсутствием надежных средств их посадки. ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» имеет большой практический опыт создания корабельной и бортовой аппаратуры управления БПЛА, а также существенный теоретический задел по способам «сухой» посадки БПЛА на кран-балку с захватным устройством в условиях качки судна [2, 3]. Достоинства способа посадки БПЛА на выдвигающуюся за борт судна кран-балку: оперативность «развертывания» и «свертывания», возможность использования для БПЛА различного типа, пригодность к размещению на судах любого класса, минимальное дополнительное оборудование на судне и БПЛА.

Беспилотные летательные аппараты судового базирования укомплектованы бортовой аппаратурой системы навигации и управления, связи и сменной целевой аппаратурой, чаще всего радиолокационной или оптико-электронной (телевизионной, тепловизионной или лазерной). Судовое оборудование включает в себя пульт управления, аппаратуру связи носителя с БПЛА, а также катапульту для пуска БПЛА и посадочное устройство [4, 5].

В зависимости от координатора — устройства, определяющего рассогласование направления полета и координаты БПЛА относительно судового посадочного устройства (точки прицеливания), возможны следующие способы управления движением БПЛА для посадки:

— автономное или автоматизированное управление БПЛА с бортовым координатором, самонаведение на зацеп устройства посадки [6];

— автономное или автоматизированное управление БПЛА с судовым координатором, где сигналы управления, обеспечивающие приведение БПЛА к зацепу посадочного устройства, по каналу связи передаются на борт БПЛА [7].

Возможно комбинированное управление с использованием информации бортового и судового координаторов, а также резервное ручное управление с визуальным наблюдением оператором движения БПЛА.

### Основные задачи управления посадкой

Первой задачей для любого способа управления посадкой является оценка возможности возвращения БПЛА на судно-носитель при имеющемся запасе горючего на борту — это задача определения программной траектории движения с учетом текущих координат и параметров движения обоих объектов, обеспечивающей минимальный путь и необходимые направление и высоту полета на конечном участке.

Траектории возвращения — движение БПЛА в горизонтальной и вертикальной плоскостях, с момента начала сближения в точке  $A_0$  с вектором скорости  $V_A$ , в точку зацепления посадочным устройством (посадка)  $\Pi_T$  (рис. 1, а, б).

В момент зацепления судно движется с вектором скорости  $V_{\Pi T}$ .

В момент времени  $t=0$  (начало маневра сближения) БПЛА находится в точке  $A_0$  с координатами  $x_{A0}, y_{A0}, z_{A0}$ , имеет скорость  $V_A$  и направление движения  $\varphi_{A0}$ . В этот момент судно с устройством посадки находится в точке  $\Pi_0$ , имеет скорость  $V_{\Pi 0}$  и направление движения  $\varphi_{\Pi 0}$ .

В общем случае траектория сближения состоит из четырех характерных частей. Первая часть, соответствующая развороту БПЛА в сто-

рону посадки, — от точки начального положения БПЛА  $A_0$  до точки окончания маневра разворота  $A_1$ .

Если пренебречь инерционностью системы управления БПЛА, то можно считать, что маневр происходит по дуге окружности минимально возможного радиуса  $R$  с центром в точке  $C_1$ .

Длина первого участка  $L_I = \varphi_I R$ , где  $\varphi_I$  — угловое расстояние между  $A_0$  и  $A_1$ ;  $R$  — радиус маневра разворота БПЛА, который определяется допустимой величиной боковой перегрузки и допустимой величиной угла скольжения.

Вторая часть траектории сближения — прямолинейный участок, соединяющий точку окончания первого маневра  $A_1$  и точку  $A_2$ , соответствующую началу второго маневра — выходу на курс судна в горизонтальной плоскости, а в вертикальной плоскости — выходу на малую высоту, обеспечивающую дальнейшее наведение на посадочное устройство. Длина этого участка в горизонтальной плоскости равна расстоянию между центрами окружностей первого и второго разворота БПЛА, т. е.  $L_{II} = |C_2 - C_1|$ . В вертикальной плоскости на этом участке происходит полет на постоянной высоте или равномерное снижение на малую высоту.

Маневр третьего участка — движение в горизонтальной плоскости по окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $C_2$  от точки  $A_2$  до точки  $A_3$ , в которой направление движения БПЛА совпадает с направлением движения носителя посадочного устройства. Длина этого участка  $L_{III} = \varphi_{III} R$ , где  $\varphi_{III}$  — угловое расстояние между точками  $A_2$  и  $A_3$ . В вертикальной плоскости на этом участке происходит снижение на малую высоту.

На последнем, четвертом участке обеспечивается точное приведение БПЛА к посадочному устройству. Здесь происходит движение, близкое к прямолинейному, по курсу носителя между точками  $A_3$  и конечной точкой  $\Pi_T$  посадки БПЛА. Длина этого участка  $L_{IV}$  имеет постоянное значение, например, 300—800 м. Эта величина выбирается заранее из условия обеспечения точного приведения БПЛА на устройство посадки. На этом участке компенсируются погрешности реализации расчетной траектории сближения и совершается снижение скорости БПЛА до минимально допустимой величины.

Параметры траектории определяются в зависимости от принятого критерия оптимальности и ограничений на параметры движения БПЛА и судна.

*Обеспечение минимального пути*

$$L(A_0, \Pi_T) \rightarrow \min L_{\Sigma}. \quad (1)$$

Если принять БПЛА материальной точкой для траектории типа рис. 1, а, задача оптими-

зации сводится к поиску  $L(A_0, A_1, A_2, A_3) \rightarrow \min L_{\Sigma}$ , так как длина участка  $L_{IV}$  принимается постоянной. Радиус маневра БПЛА в горизонтальной плоскости ограничен допустимыми значениями боковой перегрузки и угла скольжения, а в вертикальной — допустимыми значениями скорости снижения и угла атаки.

При известных координатах  $A_3$  вариационная задача поиска оптимальной функции с двумя закрепленными концами с указанными выше ограничениями решается аналитически строго [8]. Для траектории посадки БПЛА на движущееся судно координаты  $A_3$  не определены. По этой причине предложен [9] численный метод поиска параметров траектории возвращения БПЛА, оптимальных по критерию (1).

Длина горизонтальной проекции траектории сближения  $L_T$  определяется суммой длин четырех участков:  $L_T = L_{TI} + L_{TII} + L_{TIII} + L_{TIV}$ .

В вертикальной плоскости траектория возврата минимальной длины  $L_B$  грубо определяется постоянной скоростью снижения  $V_y$  как  $V_y = (y_{A0} - y_{A3}) / T_3$ , а точнее, с учетом переходных процессов набора вертикальной скорости и торможения. В вертикальной плоскости (см. рис. 1, б) траектория в общем случае также состоит из нескольких участков: набора постоянной скорости снижения, поддержания постоянной скорости снижения и уменьшения ее до нуля в точке  $A_3$ . Для исключения «просадки» при снижении БПЛА на высоту посадочного устройства необходим участок плавного изменения скорости снижения, например, по экспоненциальной траектории. Длина минимального пути возврата

$$\min L_{\Sigma} = \sqrt{L_T^2 + L_B^2}.$$

*Обеспечение минимального времени возврата*  
 $T_{вз}$  БПЛА на носитель

$$L(A_0, \Pi_T) / V_A \rightarrow \min T_{вз}. \quad (2)$$

Если скорость летательного аппарата и носителя — постоянные величины, то выбранные траектории по критериям (1) и (2) совпадают.

На конечном участке  $L_{IV}$ , длина которого мала и задана, скорость БПЛА снижается до минимально допустимой величины. На выбор типа траектории возврата этот участок не влияет.

Если скорость летательного аппарата зависит от высоты и допускается максимальный расход топлива, то наилучшей траекторией возврата будет высотная траектория. В горизонтальной плоскости она совпадает с рассмотренной ранее. В вертикальной плоскости начальный наиболее протяженный участок траектории — полет на постоянной высоте — позволяет развивать мак-

симальную горизонтальную скорость БПЛА. Снижение из точки  $A_{21}$  в точку  $A_3$  должно занимать минимальный интервал времени и имеет 3 участка, основной из которых — снижение с максимально допустимым траекторным углом наклона. Первый участок — это переход от горизонтального полета в пикирование, а третий — выход на постоянную малую высоту, исключая просадку. Расчет и реализация такого маневра отработаны, например, в ОАО «Концерн «Гранит-Электрон» для противокорабельных крылатых ракет [5, 9, 10].

Расчет протяженности траектории сближения  $L$  в реальном масштабе времени позволяет контролировать возможность возвращения БПЛА на судно-носитель посадочного устройства. Если оставшийся на борту запас горючего  $Q$  уменьшился до критической величины  $Q_{кр}$ , необходимой для возвращения на носитель, то необходимо начинать маневр возвращения БПЛА:  $Q_{кр} = Lq_{уд}$ , где  $q_{уд}$  — расход топлива на единицу пути.

Если при возвращении на носитель не обеспечивается гарантированное сцепление БПЛА с посадочным устройством и необходимо иметь запас топлива для повторного захода на посадку, траектория сближения выбирается из условия *минимального расхода топлива* БПЛА при возврате на носитель. Критерий выбора траектории в этом случае

$$L(A_0, \Pi_r) q_{уд} \rightarrow \min Q, \quad (3)$$

где  $q_{уд}$  — экономичный расход топлива на единицу пути, определяющий оптимальную высоту и скорость возврата БПЛА. В качестве базы для сравнения и первого приближения для выбора оптимальной траектории по критерию (3) можно использовать траектории, выбранные по критериям (1) или (2).

Для каждого участка I, II и III траектории формируется числовой массив  $A_i(x, y, z, t)$ . Таким образом, формируется вектор расчетной траектории сближения  $A_{тр} = [A_I(1:i_1) A_{II}(1:i_2) A_{III}(1:i_3)]$ .

Реальная траектория сближения БПЛА с судном подбирается методом численного моделирования движения БПЛА по маршруту «идеальной» траектории, когда БПЛА с системой управления принимаются идеальным безинерционным звеном. Далее моделируется движение БПЛА по этой траектории с учетом инерционности аппарата и ограничений на управляющие моменты. При этом анализируются погрешности реализации этой траектории в точке  $A_3$ . В качестве меры устранения систематической погрешности, обусловленной инерционностью аппарата и ограничениями на управляющие моменты,

предлагается вводить упреждение в управление на  $n$  шагов относительно «идеальной» траектории  $A_{тр}$  [11].

При отклонении текущих координат, измеряемых автопилотом БПЛА в боковой плоскости  $z(t)$  и высотомером в продольной плоскости  $h(t)$ , от заданных полетным заданием значений система автопилотирования и навигации автономно или при помощи БЦВМ выдает управляющие сигналы на рулевые органы, которые текущие координаты приводят в соответствие высоте полета  $h(t) = h_{тр}(t)$  и траекторным значениям в боковой плоскости  $z(t) = z_{тр}(t)$ .

Погрешность реализации этой траектории в точке  $A_3$  под действием случайных факторов внешней среды и внутренних помех в бортовой аппаратуре будет определять начальное несогласование для системы приведения БПЛА к устройству зацепления на носителе.

### Точное приведение БПЛА на зацеп посадочного устройства

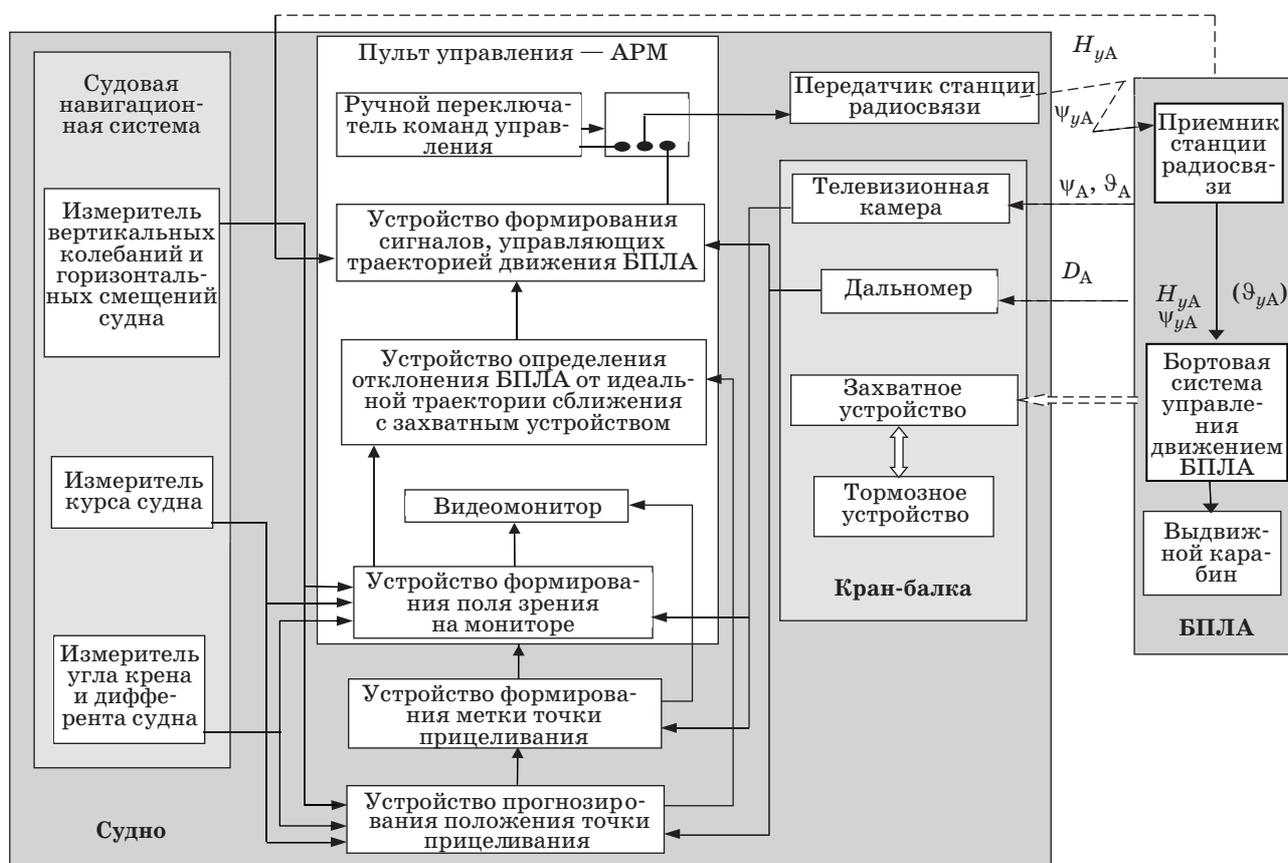
В системах приведения БПЛА к посадочному устройству информация о движении цели воспринимается координатором цели, размещенным в носовой части БПЛА или на судне [12]. На основе этой информации формируются управляющие сигналы, подаваемые в систему управления, которая обеспечивает движение аппарата по направлению к пеленгуемой цели.

На начальном этапе захода на посадку применяется инерциальное наведение на «математическую» цель с коррекцией положения БПЛА и скорости при маневре корабля-носителя по информации, передаваемой по радиолинии. На конечном участке после захвата сигнала используется самонаведение на точку прицеливания посадочного устройства.

Автономная бортовая система БПЛА наводится на точку прицеливания, которая является центром допустимой области на кран-балке, где обеспечивается сцепление БПЛА с посадочным устройством. Если эта точка имеет контраст (например, подсвечена световым фонарем), то приведение к ней летательного аппарата аналогично самонаведению крылатой ракеты на контрастную цель. Особенности здесь следующие.

Указанная точка прицеливания не имеет контраста, так как разместить в ней излучатель или отражатель невозможно по конструктивным ограничениям (в эту точку попадает БПЛА в момент сцепления с посадочным устройством). По этой причине на кран-балке и судне необходимо установить сигнальные маяки (минимум 3 световых фонаря или светоотражателя) с известным геометрическим расположением относительно

## Параметры БПЛА



■ Рис. 2. Структурная схема аппаратуры судовой системы посадки БПЛА

точки прицеливания. Здесь приведение БПЛА к точке прицеливания аналогично тому, как наводятся крылатые ракеты на неконтрастные цели. В этом случае наблюдаются контрастные ориентиры, расположенные вблизи цели, или сравнивается наблюдаемое изображение кранбалки с его эталонным изображением по принципу корреляционно-экстремальных систем.

Другой особенностью этого участка является необходимость не только привести БПЛА в точку прицеливания с минимальной погрешностью по координатам в вертикальной и боковой плоскостях, но и выдержать направление движения БПЛА параллельно скорости движения судна с точностью до единиц угловых градусов. Этого ограничения не имеют системы самонаведения ракет. Точная индикация этого направления координатором БПЛА требует продольной базы для размещения курсовых маяков, что проблематично для малоразмерных судов. Достижимые точности определения направления при помощи только поперечной базы расположения трех маяков требуют дополнительных исследований.

Практика проектирования и эксплуатации систем управления конечным положением различного назначения свидетельствует о том, что воздействие внешней среды может проявляться самым различным образом и во многих случаях носить противодействующий нормальному режиму функционирования системы характер.

Динамика этих процессов с бортовым координатором (аналогично головкам самонаведения ракет) хорошо изучена в прошлом веке и описана, например, в работах ОАО «Концерн «Гранит-Электрон». Методический аппарат оценки промаха летательного аппарата под воздействием детерминированных и случайных факторов в настоящее время хорошо отработан и изложен [13–16].

### Судовая система управления посадкой БПЛА

Важнейшим фактором, обуславливающим трудность посадки БПЛА на движущееся судно, является качка. Для компенсации влияния качки естественным техническим средством

является пространственная стабилизация захватного устройства, которая требует использования трехзвенной системы приводов. В работе [7] предлагается жестко закрепить захватное устройство на кран-балке, а стабилизировать его пространственное положение на экране монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора таким образом, чтобы в неподвижной системе координат наблюдать рассогласование текущего местонахождения БПЛА и точки прицеливания на захватном устройстве.

Состав и структурная схема связей аппаратуры судовой системы посадки БПЛА представлены на рис. 2.

Центральное место на судне занимает пульт управления — АРМ. Измерение параметров движения судна обеспечивает навигационная система судна. Кран-балка обеспечивает вынос захватного устройства для посадки БПЛА.

В состав навигационной системы входят измерители вертикальных колебаний и горизонтальных смещений судна, текущего курса судна, крена и дифферента судна. Указанные измерители обеспечивают систему управления посадкой необходимой информацией о текущем положении судна.

В состав АРМ входят переключатель команд управления с ручного режима на автоматический; устройство формирования сигналов управления траекторией сближения БПЛА с судном; устройство определения отклонения БПЛА от идеальной траектории сближения; видеомонитор, на котором отображается наблюдаемое видеоизображение и служебные метки; устройство формирования поля зрения для видеомонитора; устройство формирования метки точки прицеливания и устройство прогнозирования положения метки точки прицеливания в момент сцепления БПЛА с захватным устройством.

Важно отметить, что функциональные устройства АРМ реализуются программным путем на ЦВМ универсальной структуры аналогично прибору корабельной системы управления ракетным оружием [10]. Внутриприборные связи реализуются, например, на общей шине ISA, а межприборные — по сети Ethernet.

На кран-балке размещаются телевизионная камера (ТВК), дальномер, захватное и тормозное устройства. Для сцепления с судовым посадочным устройством на БПЛА имеется выдвижной карabin.

Конструктивно поместить ТВК непосредственно в точке прицеливания невозможно. Размещение ее на продолжении «идеальной» посадочной траектории, проходящей через центр допустимой для зацепления зоны посадочного устройства, приводит к существенному увели-

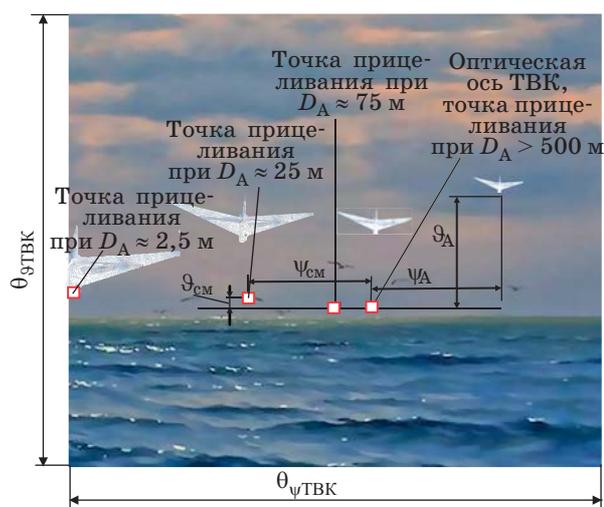
чению поперечного размера посадочной кран-балки, а также к затенению поля зрения телевизионного канала элементами конструкции посадочного устройства.

По этим причинам ТВК целесообразно разместить на внешней стороне посадочного устройства (со стороны подлета БПЛА). В такой схеме размещения угловой размер между направлением «идеальной» траектории посадки и оптической осью поля зрения ТВК не будет постоянным, как в схеме размещения, приведенной в работе [17], а будет изменяться по мере изменения дистанции.

На малой дистанции образуется «слепая» зона, где БПЛА уходит за пределы зоны наблюдения ТВК.

Пример сюжета, наблюдаемого ТВК, который видит оператор на видеомониторе, показан на рис. 3. На нем изображены БПЛА, находящиеся на разных дистанциях  $D_A$  от посадочного устройства. Угловой размер наблюдаемого изображения соответствует угловому полю зрения ТВК в горизонтальной  $\theta_{\psi\text{ТВК}}$  и вертикальной  $\theta_{\vartheta\text{ТВК}}$  плоскостях, с разрешением, например, 1024 и 820 элементов соответственно. Размерными линиями указаны измеряемые угловые координаты БПЛА ( $\vartheta_A, \psi_A$ ) относительно точки прицеливания в вертикальной и горизонтальной плоскостях и аналогичные координаты ( $\vartheta_{\text{см}}, \psi_{\text{см}}$ ) смещения точки прицеливания относительно оптической оси ТВК.

На экран видеомонитора выводится световая метка, соответствующая угловому положению



■ **Рис. 3.** Изображение на мониторе АРМ при отсутствии качки судна или при компенсации угловых и линейных перемещений посадочного устройства и закрепленной на кран-балке ТВК при качке судна

точки прицеливания. Эта метка изображается, например, в виде контрастного квадрата с белым кругом в центре. Положение метки на экране формируется с учетом параллакса — смещением объектива ТВК относительно точки прицеливания на  $z_{см}$  в горизонтальной и  $y_{см}$  вертикальной плоскостях:

$$\psi_{см} = \arcsin(z_{см}/D_A); \vartheta_{см} = \arcsin(y_{см}/D_A), \quad (4)$$

где  $\psi_{см}$  и  $\vartheta_{см}$  — углы смещения метки прицеливания в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $D_A$  — дистанция до БПЛА, измеряемая дальномером, установленным на крап-балке в непосредственной близости от объектива ТВК.

Очевидно, что при значениях  $\psi_{см} \approx \theta_{\psi ТВК}/2$  или  $\vartheta_{см} \approx \theta_{\vartheta ТВК}/2$  БПЛА выйдет из поля зрения ТВК.

Слепая зона  $D_{мин}$  — дистанция, ближе которой БПЛА (точнее, его метка, соответствующая центру выдвинутого карабина) не наблюдается, определяется соотношениями

$$D_{мин} \approx \max[z_{см}/\sin(\theta_{\psi ТВК}/2); y_{см}/\sin(\theta_{\vartheta ТВК}/2)].$$

Расширение поля зрения ТВК с целью увеличить вероятность захвата БПЛА на сопровождение и обеспечить работу в условиях качки судна положительно скажется на уменьшении слепой зоны. Однако точность определения углового отклонения БПЛА от точки прицеливания в горизонтальной и вертикальной плоскостях  $\psi_A$  и  $\vartheta_A$  будет выше при уменьшении угла зрения ТВК [6].

Для измерения дистанции до БПЛА в пределах до 2—3 км может использоваться малогабаритный лазерный локаатор на полупроводниковом импульсном излучателе [10].

При наблюдении статического сюжета измерение углового положения БПЛА в поле зрения ТВК может осуществлять оператор, подводя мышью курсор-метку БПЛА на нижнюю точку фюзеляжа текущего изображения БПЛА. Обозначив эту характерную контрастную точку объекта, метка переходит в автоматический режим сопровождения ее на экране. Алгоритмы и система автоматического сопровождения заданной точки объекта по угловым координатам приведены в работах [2, 17].

В условиях хорошей освещенности и контраста на экране монитора можно наблюдать силуэт БПЛА, а в плохих условиях — только пятно от светового фонаря либо отраженный от световозвращателя сигнал лазерного локаатора. При использовании лазерного локаатора, совмещенного с телевизионной приемной системой, на экране монитора метка БПЛА формируется из пятна отраженного сигнала световозвращателя. Это пятно занимает несколько элементов разрешения даже при отсутствии качки в силу различных

причин расфокусировки, аберрации и вибраций [12]. Угловые координаты БПЛА определяются по энергетическому центру пятна как группы элементов разрешения приемной системы ТВК, сигнал от которых превысил заданный порог обнаружения.

Для удобства наблюдения оператором на изображение реального фонаря БПЛА и точки прицеливания накладывается интенсивное изображение, близкое к круговому, диаметром 5—7 элементов разрешения.

Отметим, что способ формирования метки БПЛА на экране монитора выбирает оператор в зависимости от условий освещенности и возможности наблюдения БПЛА на фоне неба или других объектов. Очевидно, что наблюдение БПЛА на фоне солнца или луны, солнечной и лунной водной дорожки, если их изображение попадает в поле зрения ТВК, серьезно затруднено и требует специальных средств оптической фильтрации. Рекомендуется таких ситуаций избегать, выбирая соответствующий курс движения судна при посадке БПЛА.

Главной особенностью судовых систем управления посадкой БПЛА является качка, поэтому исследование влияния качки в целях оценки возможности посадки БПЛА и поиск технических путей снижения отрицательного влияния качки являются важной научной и практической задачей.

### Смещения захватного устройства при регулярной качке

В общем случае при регулярной качке колебания судна содержат следующие составляющие [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{бортовая качка } \gamma_{кч} = \gamma_m \sin(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma); \\ \text{килевая качка } \vartheta_{кч} = \vartheta_m \sin(\omega_\vartheta t + \varphi_\vartheta); \\ \text{колебания рыскания} \\ \text{судна } \psi_{кч} = \psi_m \sin(\omega_\psi t + \varphi_\psi); \\ \text{вертикальные колебания центра} \\ \text{масс судна } h_{кч} = h_m \sin(\omega_h t + \varphi_h); \\ \text{боковые колебания судна} \\ z_{кч} = z_m \sin(\omega_z t + \varphi_z); \\ \text{продольные колебания} \\ \text{скорости судна } V_{кч} = \Delta V_m \sin(\omega_v t + \varphi_v), \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $\gamma_m, \vartheta_m, \psi_m, h_m, z_m$  — амплитуды угловых и линейных колебаний судна;  $\Delta V_m$  — амплитуда колебаний скорости движения судна;  $\omega_\gamma, \omega_\vartheta, \omega_\psi, \omega_h, \omega_z, \omega_v$  — частоты колебаний;  $\varphi_\gamma, \varphi_\vartheta, \varphi_\psi, \varphi_h, \varphi_z, \varphi_v$  — фазовые углы, соответствующие начальному моменту времени  $t_0$  наблюдения колебаний.

Захватное приспособление (точка прицеливания БПЛА) колеблется относительно своего статического (без качки и хода судна) положения в горизонтальной  $Z_{кч}(t)$ , вертикальной  $Y_{кч}(t)$  и продольной  $X_{кч}(t)$  плоскостях под действием качки судна:

$$\begin{aligned} Z_{кч}(t) &= R_\gamma (\cos \gamma_0 - \cos(\gamma_0 - \gamma_m (\omega_\gamma t + \varphi_\gamma))) + \\ &+ R_\psi (\cos \psi_0 - \cos(\psi_0 - \psi_m (\omega_\psi t + \varphi_\psi))) + \\ &+ z_m \sin(\omega_z t + \varphi_z); \\ Y_{кч}(t) &= R_\gamma (\sin \gamma_0 - \sin(\gamma_0 - \gamma_m (\omega_\gamma t + \varphi_\gamma))) + \\ &+ R_\vartheta (\sin \vartheta_0 - \sin(\vartheta_0 - \vartheta_m (\omega_\vartheta t + \varphi_\vartheta))) + \\ &+ h_m \sin(\omega_h t + \varphi_h); \\ X_{кч}(t) &= R_\psi (\sin \psi_0 - \sin(\psi_0 - \psi_m (\omega_\psi t + \varphi_\psi))) + \\ &+ R_\vartheta (\cos \vartheta_0 - \cos(\vartheta_0 - \vartheta_m (\omega_\vartheta t + \varphi_\vartheta))) + \\ &+ \int_0^t \Delta V_m \sin(\omega_v t + \varphi_v) dt, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_\gamma, R_\psi, R_\vartheta$  — расстояния точки прицеливания до осей колебаний судна, соответствующие радиусам колебаний по углам  $\gamma, \psi, \vartheta$ ;  $\gamma_0, \psi_0, \vartheta_0$  — углы наклона  $R_\gamma, R_\psi, R_\vartheta$  при отсутствии качки;  $h_m, z_m$  — амплитуды гармонических колебаний точки прицеливания посадочного устройства в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  $R_\gamma, R_\psi, R_\vartheta, \gamma_0, \psi_0, \vartheta_0$  — это постоянные величины, определяемые конструкцией судна, его текущей загрузкой и расположением на нем кран-балки.

Особенностью (6) является нелинейная зависимость смещения захватного устройства по осям  $x, y, z$ .

Если навигационная система судна обеспечивает в текущем времени измерения переменных параметров качки судна [значения амплитуды, частоты и фазы каждой из гармоник (5)], а значения постоянных конструктивных параметров судна  $R_\gamma, R_\psi, R_\vartheta, \gamma_0, \psi_0, \vartheta_0$  известны, то соотношения (6) определяют смещение захватного устройства  $Y_{кч}(t), Z_{кч}(t)$  и  $X_{кч}(t)$  в вертикальной, горизонтальной и продольной плоскостях.

Таким образом, для принятой гипотезы смещение захватного устройства  $Z_{кч}(t)$  и  $Y_{кч}(t)$  в условиях регулярной качки определяется суммой трех гармонических составляющих.

При наличии на судне навигационного оборудования, позволяющего измерить параметры качки (5), смещение захватного устройства определяется непосредственно по формулам (6).

Показания акселерометров ( $\ddot{x}_a(t), \ddot{y}_a(t), \ddot{z}_a(t)$ ), ортогонально расположенных на кран-балке у захватного устройства, по каждой координате имеют по три составляющие, обусловленные со-

ответствующими компонентами качки (6), указанные индексами ( $\psi, \vartheta, \gamma, x, y, z$ ) членов в правой части следующих равенств:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_a(t) &= \ddot{x}_{a\psi}(t) + \ddot{x}_{a\vartheta}(t) + \ddot{x}_{ax}(t); \\ \ddot{y}_a(t) &= \ddot{y}_{a\gamma}(t) + \ddot{y}_{a\vartheta}(t) + \ddot{y}_{ay}(t); \\ \ddot{z}_a(t) &= \ddot{z}_{a\gamma}(t) + \ddot{z}_{a\psi}(t) + \ddot{z}_{az}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Если в месте крепления акселерометров установить на осях  $x, y, z$  датчики угловых скоростей, то задача определения смещения захватного устройства при регулярной качке упрощается [17].

### Прогноз смещения захватного приспособления

Снижение величины промаха в условиях качки достигается за счет прогноза положения точки прицеливания в конечный момент  $t_k$  движения БПЛА, т. е. в момент сцепления его с захватным приспособлением [19]. Прогнозируемое положение точки прицеливания  $X_{пр}, Y_{пр}, Z_{пр}$  в текущий момент времени, принимаемый  $t_0=0$ , в соответствии с (5):

$$\begin{aligned} X_{пр}(t_k) &= X_{кч}(t_k, \varphi_\psi(t_0), \varphi_v(t_0)); \\ Y_{пр}(t_k) &= Y_{кч}(t_k, \varphi_\gamma(t_0), \varphi_\vartheta(t_0), \varphi_h(t_0)); \\ Z_{пр}(t_k) &= Z_{кч}(t_k, \varphi_\gamma(t_0), \varphi_\psi(t_0), \varphi_z(t_0)), \end{aligned} \quad (8)$$

где время подхода БПЛА к точке прицеливания ( $t_k$ ) определяется дистанцией  $D_A(t)$  от точки прицеливания до БПЛА в текущий момент времени, с относительной скоростью  $V_{Ан}$  сближения БПЛА и носителя:

$$\begin{aligned} t_k &= (D_A(t=0) + X_{пр}(t_k)) / (V_{Ан}(t) + \\ &+ \Delta V_{\max} \sin(\omega_v t_k + \varphi_v)). \end{aligned} \quad (9)$$

Величины  $Y_{пр}, Z_{пр}$  прогнозируемого смещения точки прицеливания (8) вводятся в закон управления, например, как поправка к наблюдаемому положению точки прицеливания относительно БПЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\begin{aligned} \Delta Y_y &= k_y (Y_A - Y_{пр}); \\ \Delta \psi_y &= k_{\psi_y} \arcsin((Z_A - Z_{пр}) / D_A(t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Delta Y_y$  и  $\Delta \psi_y$  — поправки к сигналам управления высотой и направлением полета в горизонтальной плоскости БПЛА;  $Y_A, Z_A$  — текущие отклонения БПЛА от идеальной траектории (линии, проходящей через точку прицеливания параллельно курсу движения судна) в вертикальной и горизонтальной плоскостях;  $k_y, k_{\psi_y}$  — коэффици-

енты усиления, обеспечивающие выведение БПЛА на идеальную траекторию в непосредственной близости к точке прицеливания, не допуская просадки по высоте и обеспечивая допустимые угловые скорости и ускорения в момент сцепления с захватным устройством.

Наведение БПЛА не в текущее положение посадочного устройства, а в прогнозируемое его положение, соответствующее моменту сцепления с БПЛА, существенно снижает величину динамической ошибки (промаха), обусловленной качкой судна.

При точном измерении амплитуды, частоты и фазы всех компонентов качки и отсутствии случайной составляющей управление равносильно приведению БПЛА в неподвижную точку. Ошибка приведения БПЛА к зацепу определяется ошибками обработки возмущений среды и точностью прогноза пространственного положения посадочного устройства.

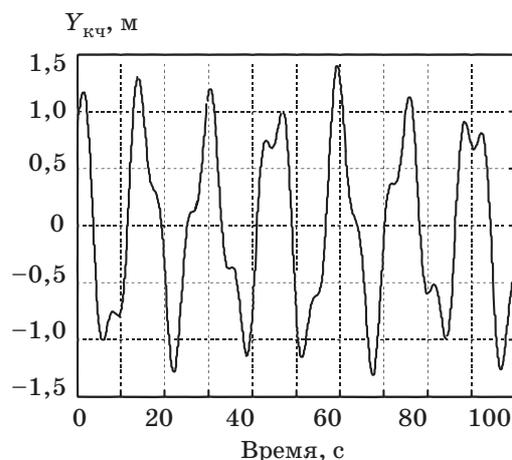
Влияние погрешности в определении параметров компонентов качки на ошибку прогноза положения захватного устройства в момент сцепления с БПЛА иллюстрируют графики (рис. 4 и 5).

Если качка судна регулярная, то смещение захватного устройства в основном определяется уравнениями (5). Параметры качки (амплитуда, частота и фаза) каждой из шести компонентов качки определяется путем подбора их значений на временном интервале, предшествующем моменту определения прогнозируемого положения посадочного устройства. Это достигается путем минимизации невязки синтезируемых и измеряемых смещений захватного устройства.

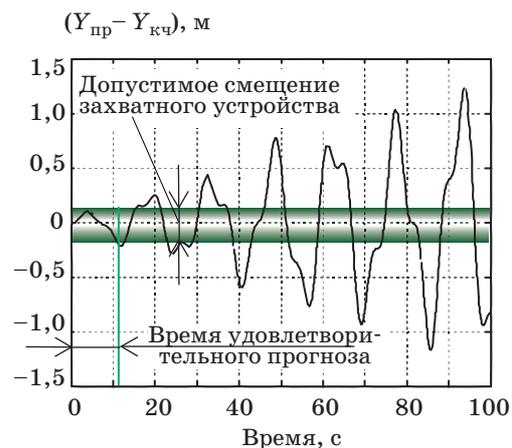
При отсутствии случайной составляющей точность прогноза  $Y_{пр}(t_k)$  и  $Z_{пр}(t_k)$  определяется точностью текущих измерений, т. е.  $\ddot{x}(t)$ ,  $\ddot{y}(t)$ ,  $\ddot{z}(t)$ . Увеличение интервала наблюдения позволит уменьшить влияние высокочастотной по сравнению с периодом качки составляющей, однако уменьшит вероятность постоянства параметров компонентов качки на прогнозируемом интервале.

Графики наглядно иллюстрируют возрастание угловых колебаний точки прицеливания ( $Y_{кч}/D_A$ ,  $Z_{кч}/D_A$ ) по мере сближения БПЛА с судном без прогноза положения точки прицеливания и уменьшение с прогнозированием.

Качественно возможность и целесообразность прогноза параметров смещения посадочного устройства на кран-балке движущегося судна подтверждены на нелинейной модели однокомпонентной бортовой качки [17] и на модели нерегулярной бортовой качки [19] со спектральной плотностью, соответствующей волнению 3 балла [18].



■ Рис. 4. График колебаний точки крепления акселерометров в вертикальной плоскости ( $Y_{кч}$ ) под влиянием трех компонентов аналогов: бортовой качки (амплитудой  $A_1 = 1$  м, периодом  $T_1 = 15$  с, начальной фазой  $\varphi_1 = \pi/2$ ), килевой качки ( $A_2 = 0,33$  м,  $T_2 = 5,7$  с,  $\varphi_2 = -\pi/4$ ) и вертикальной качки ( $A_3 = 0,1$  м,  $T_3 = 11,4$  с,  $\varphi_3 = \pi/6$ )



■ Рис. 5. График разницы истинного  $Y_{кч}(t)$  и прогнозируемого  $Y_{пр}(t)$  значений при погрешности определения девяти параметров качки на 1% в сторону их увеличения

## Заключение

Основными вопросами теории посадки БПЛА на малоразмерные суда, требующими дальнейших исследований, являются следующие.

1. Способ посадки БПЛА на кран-балку имеет ряд преимуществ перед другими способами «мокрой» и «сухой» посадки. Однако требуется разработка метода количественной оценки этих преимуществ. Их отсутствие затрудняет признание приоритета этого способа перед другими.

2. Разработан новый метод расчета оптимальных траекторий возврата БПЛА на судно-носитель и программной реализации алгоритмов

управления для приведения БПЛА в зону захвата его судовой системой управления посадкой. Точность приведения БПЛА в зону обнаружения и сопровождения посадочного устройства бортовым координатором или обнаружения и сопровождения БПЛА судовым координатором определяется точностью навигационных систем БПЛА и судна, а также ветровыми возмущениями атмосферы. Методы ее оценки известны из теории ракетных систем.

Методы точного приведения БПЛА к зацепу посадочного устройства во многом заимствованы из систем самонаведения ракет, теория которых разработана в прошлом веке. Указанные в работе отличия требуют дополнительных исследований как измерительных каналов координаторов, так и алгоритмов управления, особенно в условиях возмущений атмосферы и качки судна, вызванной движением судна.

3. Судовая система управления посадкой БПЛА на кран-балку требует точного навигационного обеспечения в части измерения угловых

и линейных колебаний судна для определения смещения посадочного устройства и поля зрения телевизионного координатора. Эта информация позволит оператору наблюдать процесс приближения БПЛА и контролировать отклонения реальной траектории от траектории, требуемой для посадки БПЛА.

4. Для посадки БПЛА на судно в условиях качки целесообразно прогнозировать ее текущие параметры и заранее определять положение посадочного устройства в момент сцепления с БПЛА. Наведение БПЛА в прогнозируемое положение позволяет существенно повысить точность приведения БПЛА к зацепу посадочного устройства и расширить диапазон внешних условий, при которых обеспечивается надежная посадка БПЛА. Определение рациональных способов расчета параметров и прогноза смещения посадочного устройства должно быть предметом дальнейших исследований авторов.

Исследования проводятся при поддержке РФФИ, грант № 13-08-00925А.

## Литература

1. Соловьева В. В. Обзор способов посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда // Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения: сб. ст. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. С. 14–20.
2. Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения // Тр. XXXX Российского семинара «Механика и процессы управления»/РАН, Минобороны РФ, Минобрнауки РФ, МСНТ. М., 2010. С. 55–64.
3. Подоплекин Ю. Ф., Толмачев С. Г., Шаров С. Н. Информационно-управляющая система приведения БПЛА на движущееся судно // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 22–28.
4. Дремлюга Г. П., Есин С. А., Иванов Ю. Л., Лященко В. А. Беспилотные летательные аппараты: Состояние и тенденции развития/под ред. д.т.н., проф. Ю. Л. Иванова. – М.: Варяг, 2004. – 176 с.
5. Подоплекин Ю. Ф. Соловьева В. В., Яцковская И. М. Судовой комплекс многофункционального мониторинга наземной и морской поверхности на базе беспилотного летательного аппарата // Проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно и технические пути их решения: сб. ст. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. С. 5–13.
6. Шаров С. Н. и др. Автономная бортовая система управления посадкой БПЛА на движущееся судно. Патент на полезную модель. БИ № 31, 10.08.11.
7. Шаров С. Н. и др. Судовая система управления посадкой БПЛА на движущееся судно. Патент на полезную модель. БИ № 28, 10.10.11.
8. Hamidreza Chitsaz, Steven M. LaValle. Time-optimal paths for a Dubins Airplane // Proc. of the 46th IEEE Conf. Decision and Control. 2007. P. 2379–2384.
9. Петухова Е. С. Особенности траектории возвращения беспилотного летательного аппарата на движущийся носитель // Изв. РАН. 2010. Вып. 4(66). С. 40–48.
10. Шаров С. Н. Локационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2009. – 332 с.
11. Andrievsky V. R., Sharov S. N. Technological Ways for Ensuring of Unmanned Aerial Vehicle on a Ship // World Maritime Technology Conf., WMTС 2012, May 29 – June 1, 2012, Saint-Petersburg, Russia. P. 91–92.
12. Шаров С. Н. Информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. – 256 с.
13. Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.
14. Коржавин Г. А., Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Информационные и управляющие системы БПЛА // Изв. АЭН РФ. 2010. № 1. С. 88–98.
15. Ren W., Beard R. W. Trajectory Tracking for Unmanned Air Vehicles With Velocity and Heading Rate Constraints // IEEE Trans. Control Systems Technol. 2004. Vol. 12(5). P. 706–716.
16. Sasongko R. A., Sembiring J., Muhammad H., Mulyanto T. Path Following System of Small Unmanned

Autonomous Vehicle for Surveillance Application // Proc. 8th Asian Control Conf. (ASCC), 2011, Kaohsiung, Taiwan, May 15–18, 2011. P. 1259–1264.

17. Андриевский Б. Р., Шаров С. Н. Определение положения посадочного устройства БПЛА в условиях качки // Морской вестник. 2012. № 2(42). С. 75–77.

18. Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. Т. 2. – 440 с.

19. Толмачев С. Г., Шаров С. Н. Прогнозирование положения захватного устройства при посадке БПЛА на движущееся судно в условиях качки: сб. материалов XX Санкт-Петербургской Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам/под ред. В. Г. Пешехонова / ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электроприбор». СПб., 2013. С. 205–208.

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), т. к. этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.doc); AdobeIllustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai).

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg.

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы предоставляйте в двух вариантах: первый на языках оригиналов и второй — перевод (не транслитерация, а перевод) списка на английский язык.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru

УДК 004.75

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЭРЛАНГОВСКОГО СТАРЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

**Б. Я. Советов,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**М. О. Колбанёв,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный экономический университет

**Т. М. Татарникова,**

доктор техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается процесс предоставления информационной услуги, который регламентируется соглашением о качестве обслуживания. Предлагается процедура вычисления вероятности своевременной обработки запроса пользователя как одной из основных характеристик качества обслуживания. Приводится методика оценки вероятности своевременного предоставления информационных услуг центрами обработки данных. Показано, что искомая вероятность может быть вычислена, если преобразование Лапласа — Стильтьеса функции распределения времени обработки запроса пользователя представляет собой произведение или частное двух функций, является суперпозицией двух функций или задано неявно.

**Ключевые слова** — качество обслуживания клиента, информационная услуга, показатели качества предоставления услуг, центр обработки данных, вероятность своевременного предоставления информационной услуги.

### Введение

В последние годы государственными органами и бизнесом все шире используются центры обработки данных (ЦОД), обеспечивающие надежное хранение данных, круглосуточную поддержку бизнес-процессов, качественное предоставление других информационных услуг [1, 2].

Процесс предоставления услуг регламентируется соглашениями о качестве обслуживания (Service Level Agreement — SLA). SLA — это часть договора между провайдером и клиентом, в котором приводится система показателей для контроля качества предоставляемых услуг, а также штрафы за нарушение соглашения и вознаграждения в случае успешного его выполнения.

### Вероятность эрланговского старения информации как характеристика качества обслуживания

SLA не регламентирует содержательную сторону процесса информационного взаимо-

действия, а относится только к процессу предоставления информационной услуги. Качество этого процесса оценивается вероятностью своевременной обработки запроса пользователя, под которой понимается вероятность того, что ответ на запрос будет получен за допустимое время [3]. При моделировании сложных информационных систем и сетей, подобных ЦОД, эту характеристику обычно называют вероятностью старения информации или вероятностью своевременного предоставления информационной услуги ( $P_{\text{усл}}$ ). В общем случае  $P_{\text{усл}}$  определяется выражением

$$P_{\text{усл}} = \int_0^{\infty} \varphi_{\text{доп}}(x) dT(x), \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{доп}}(x)$  — функция распределения (ФР) допустимого времени реализации моделируемого процесса предоставления информационной услуги, устанавливаемая SLA;  $T(x)$  — ФР времени реализации этого процесса.

При нормировании вероятности  $P_{\text{усл}}$ , как правило, выбирается постоянное ограничение на время предоставления услуги  $\varphi_{\text{доп}}(x)$ . Приме-

ром такой нормы может служить рекомендация Q.543ITU-T, в которой один из показателей качества обслуживания вводится как 95%-квантили распределений времени своевременной обработки запросов пользователей. В ряде работ получены результаты для так называемого экспоненциального старения, когда функция  $\varphi_{\text{доп}}(x)$  имеет показательное распределение.

Наиболее общим случаем является использование в качестве ограничения обобщенного распределения Эрланга, т. е. функции вида

$$\varphi(x) = 1 - \sum_{r=1}^n \eta_r e^{-k_r \gamma_r x} \sum_{i=0}^{k_r-1} \frac{(k_r \gamma_r x)^i}{i!}, \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^{n_j} \eta_r = 1, \quad \frac{1}{\gamma} = \sum_{r=1}^n \eta_r / \gamma_r,$$

где  $1/\gamma$  — среднее допустимое время предоставления услуги. Эту характеристику можно назвать вероятностью эрланговского старения информации ЦОД. Путем соответствующего выбора значений параметров  $n$ ,  $\eta_r$ ,  $k_r$  и  $\gamma_r$  функцией (2) можно достаточно точно аппроксимировать любую реальную ФР допустимого времени предоставления услуги. Так, например, при  $n=1$  и  $k_r \rightarrow \infty$  функция (2) стремится к постоянному ограничению, а при  $n=1$  и  $k_r=1$  превращается в экспоненциальное распределение.

Подставляя (2) в (1), после ряда преобразований получаем

$$P_{\text{усл}} = 1 - \sum_{r=1}^n \eta_r \sum_{i=0}^{k_r-1} (-1)^i \frac{s_0^i}{i!} t^{(i)}(s_0), \quad (3)$$

где  $s_0 = k_r \gamma_r$ ;  $t^{(i)}(s_0)$  — значение  $i$ -й производной преобразования Лапласа — Стильтьеса (ПЛС) функции распределения времени предоставления услуги в точке  $s_0$ .

### Процедура вычисления вероятности $P_{\text{усл}}$

Рассмотрим лежащую в основе расчета вероятностей  $P_{\text{усл}}$  по формуле (3) процедуру вычисления производных от ПЛС ФР  $t(s)$  в точке  $s_0$ , предполагая, что функция  $t(s)$  может представлять собой произведение или частное двух функций, может быть сложной функцией (суперпозицией двух функций) или может быть задана неявно.

Пусть  $x(s)$  и  $y(s)$   $n$  раз дифференцируемы в точке  $s=s_0$ . Тогда для  $n$ -й производной  $Z_{s_0}^{(n)}$  функции  $Z(s)=x(s)y(s)$  в точке  $s_0$  справедлива формула Лейбница

$$Z_{s_0}^{(n)} = \sum_{i=0}^n c_n^i x_{s_0}^{(n-i)} y_{s_0}^{(i)}, \quad (4)$$

где  $x_{s_0}^{(i)}$  и  $y_{s_0}^{(i)}$  — значения производных функций  $x(s)$  и  $y(s)$  в точке  $s_0$  и предполагается, что

$$x_{s_0}^{(0)} = x(s_0), \quad y_{s_0}^{(0)} = y(s_0) \quad \text{и} \quad Z_{s_0}^{(0)} = Z(s_0);$$

$$c_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} \text{ — биномиальный коэффициент.}$$

Если функция  $Z(s)=x(s)/y(s)$ , то  $n$ -я производная  $Z_{s_0}^{(n)}$  может быть вычислена рекуррентно. Умножим левую и правую части последнего уравнения на  $y(s)$  и возьмем  $n$ -ю производную от левой и правой частей полученного равенства. Тогда, применяя (4), получим

$$x_{s_0}^{(n)} = \sum_{i=0}^n c_n^i y_{s_0}^{(n-i)} Z_{s_0}^{(i)}, \quad (5)$$

откуда следует рекуррентное соотношение

$$Z_{s_0}^{(n)} = \frac{x_{s_0}^{(n)} - \sum_{i=0}^{n-1} c_n^i y_{s_0}^{(n-i)} Z_{s_0}^{(i)}}{y(s_0)}, \quad (6)$$

которое позволяет вычислить  $Z_{s_0}^{(n)}$  через производные  $Z(s)$  в точке  $s_0$  более низких порядков.

Если функция  $Z(s)=y[x(s)]$  и известны значения  $y_{x_0}^{(i)} (i=\overline{1, n})$  производных по  $x$  функции  $y(x)$  в точке  $x_0=x(s_0)$ , то  $Z_{s_0}^{(n)}$  может быть вычислена следующим образом:

$$Z_{s_0}^{(1)} = y_x^{(1)} x_s^{(1)}. \quad (7)$$

Переходя к производным порядка  $n$  и применяя (4), получаем

$$Z_{s_0}^{(n)} = \sum_{i=0}^{n-1} c_{n-1}^i \left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(n-1-i)} x_{s_0}^{(i+1)}, \quad (8)$$

где  $\left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(i)}$  —  $i$ -я производная по  $s$  функции  $dy(x)/dx$  в точке  $s_0$ .

Формула (8) позволяет вычислить  $Z_{s_0}^{(n)}$ , если известны производные  $x_{s_0}^{(1)}, \dots, x_{s_0}^{(n)}$  и  $y_{x_0}^{(1)}, \left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(1)}, \dots, \left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(n-1)}$ , причем последние также зависят от производных функции  $x(s)$  порядка не выше  $(n-1)$  и могут быть вычислены рекуррентно:

$$\begin{aligned} \left[ y_x^{(m)} \right]_{s_0}^{(1)} &= y_x^{(m+1)} x_{s_0}^{(1)}, \quad m = \overline{1, n-1}; \\ &\dots\dots\dots \\ \left[ y_x^{(m)} \right]_{s_0}^{(k)} &= \sum_{v=0}^{k-1} c_{k-1}^v \left[ y_x^{(m+1)} \right]_{s_0}^{(k-1-v)} x_{s_0}^{(v+1)}, \quad m = \overline{1, n-k}; \\ &\dots\dots\dots \\ \left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(n-1)} &= \sum_{v=0}^{n-2} c_{n-2}^v \left[ y_x^{(n)} \right]_{s_0}^{(n-2-v)} x_{s_0}^{(v+1)}, \quad (9) \end{aligned}$$

где  $\left[ y_x^{(m)} \right]_{s_0}^{(k)}$  —  $k$ -я производная по  $s$  функции  $d^m y(x)/dx^m$  в точке  $s_0$ .

Пусть теперь  $x(s) = y[x(s)] + s$ . Тогда после дифференцирования левой и правой частей и приведения подобных для первой производной  $x_{s_0}^{(1)}$  получаем

$$x_{s_0}^{(1)} = 1 / \left( 1 - y_x^{(1)} \right), \quad (10)$$

а для производных более высокого порядка непосредственно из (8) после замены  $Z(s)$  на  $x(s)$  получаем следующую рекуррентную формулу:

$$x_{s_0}^{(n)} = \frac{\sum_{i=0}^{n-2} c_{n-1}^i \left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(n-1-i)} x_{s_0}^{(i+1)}}{1 - y_x^{(1)}}, \quad (11)$$

где производные  $\left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(k)}$  ( $k = \overline{1, n-1}$ ) могут быть рассчитаны по формуле (9).

Таким образом, для того чтобы вычислить  $n$ -ю производную ( $n > 1$ ) функции  $x(s) = y[x(s)] + s$ , необходимо вычислить:

$x_{s_0}^{(1)}$  по формуле (10);  
 $\left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(1)}, \dots, \left[ y_x^{(n-1)} \right]_{s_0}^{(1)}$  по формуле (9) при  $k = 1$  и  $m = 1, 2, \dots, n-1$ ;

$x_{s_0}^{(2)}$  по формуле (11);  
 $\left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(2)}, \dots, \left[ y_x^{(n-2)} \right]_{s_0}^{(2)}$  по формуле (9) при  $k = 1$  и  $m = 1, 2, \dots, n-2$ ;

$x_{s_0}^{(3)}$  по формуле (11)  
 и так далее, пока не будут получены значения  $\left[ y_x^{(1)} \right]_{s_0}^{(n-1)}$  и  $x_{s_0}^{(n)}$ .

### Приложение вычисления вероятности эрланговского старения информации для ЦОД

Проиллюстрируем изложенную процедуру вычисления вероятности эрланговского старения на примере ЦОД, который содержит серверы, обменивающиеся блоками данных взаимодействия (БДВ). Предположим, что обмен осуществляется через среду множественного доступа, а при обработке данных серверами используется дисциплина обслуживания с относительными приоритетами. Структура современного ЦОД подробно рассматривается в работе [4].

В этом случае для ПЛС ФР времени  $t_h(s)$  процесса предоставления услуги в ответ на БДВ с относительным приоритетом  $h$  имеем

$$t_h(s) = \omega_h^{\text{обп}}(s) \beta_h(s) \omega^{\text{дост}}(s), \quad (12)$$

где  $\omega_h^{\text{обп}}(s)$  и  $\beta_h(s)$  — соответственно ПЛС ФР времени ожидания начала обработки и времени обработки в сервере БДВ с приоритетом  $h$ ;  $\omega^{\text{дост}}(s)$  — ПЛС ФР времени доставки БДВ к серверу через среду множественного доступа.

Для  $\omega_h^{\text{обп}}(s)$  справедливы выражения

$$\omega_h^{\text{обп}}(s) = \frac{(1-\rho)G_h(s) + \sum_{j:h_i>h} \lambda_j [1-\beta_j(G_h(s))]}{s - \sum_{j:h_i=h} \lambda_j [1-\beta_j(G_h(s))]}, \quad (13)$$

$$G_h(s) = s + \sum_{j:h_i<h} \lambda_j [1-\beta_j(G_h(s))], \quad (14)$$

где  $\rho$  — загрузка сервера;  $\lambda_j$  — интенсивность поступления БДВ, имеющих приоритет  $j$ .

Преобразование  $\omega^{\text{дост}}(s)$  определяется протоколами доступа управляющих элементов к среде передачи и управления логическим каналом и параметрами физического уровня и среды передачи [5]:

$$\omega^{\text{дост}}(s) = \frac{s(1-\rho_y)g(e^{sT})}{s - \lambda_y + \lambda_y g(e^{sT})}, \quad (15)$$

где  $\rho_y$  и  $\lambda_y$  — соответственно загрузка и интенсивность потока БДВ на среду множественного доступа;  $T$  — временной параметр среды множественного доступа;  $g(e^{sT})$  — ПЛС ФР интервала обслуживания БДВ для выбранной совокупности указанных протоколов.

**Методика вычисления вероятности своевременного предоставления информационной услуги**

В соответствии с разработанным методом вычисление вероятности  $P_{\text{усл}}$  осуществляется в следующем порядке.

1. Найти значения производных  $\beta_j^{(i)}(s_0)$  от ПЛС  $\beta_j(s)$  в точке  $s_0$  ( $i=1, k_r-1$ ). Если, например, время обработки БДУ с приоритетом  $j$  распределено по показательному закону со средним значением  $\bar{t}_j$ , то

$$\beta_j(s) = 1 / (1 + \bar{t}_j s) \quad (16)$$

и искомые производные

$$\beta_j^{(i)}(s) = (-1)^i i! \frac{(\bar{t}_j)^i}{(1 + \bar{t}_j s_0)^{i+1}}. \quad (17)$$

2. Найти значения производных  $\beta_j^{(i)}(G_0)$  функций  $\beta_j(G_h(s))$  по  $G_h(s)$  в точке  $G_0 = G_h(s_0)$ . Решая (14) методом последовательных приближений при  $s=s_0$ , находим  $G_0$ , а затем — искомые значения  $\beta_j^{(i)}(G_0)$  по формуле (17) путем замены  $s_0$  на  $G_0$ .

3. Найти значения производных  $\omega_h^{\text{обп}(i)}(s_0)$  от преобразования  $\omega_h^{\text{обп}(i)}(s)$  в точке  $s_0$ . Для этого обозначим числитель и знаменатель формулы (13)  $\omega_{h,1}^{\text{обп}}(s)$  и  $\omega_{h,2}^{\text{обп}}(s)$  соответственно.

Очевидно, что производные  $\omega_{h,1}^{\text{обп}}(s_0)$  и  $\omega_{h,2}^{\text{обп}}(s_0)$  равны

$$\omega_{h,1}^{\text{обп}(i)}(s_0) = (1 - \rho) G_h^{(i)}(s_0) - \sum_{j:h_j > h} \lambda_j [\beta_j(G_h(s))]_{s_0}^{(i)}; \quad (18)$$

$$\omega_{h,2}^{\text{обп}(i)} = \begin{cases} 1 + \sum_{j:h_j = h} \lambda_j [\beta_j(G_h(s))]_{s_0}^{(i)} & \text{при } i=1; \\ \sum_{j:h_j = h} \lambda_j [\beta_j(G_h(s))]_{s_0}^{(i)} & \text{при } i > 1. \end{cases} \quad (19)$$

В свою очередь производные  $G_h^{(i)}(s_0)$  функции (14) могут быть вычислены из (9)—(11), если положить  $x(s) = G_h(s)$ , а производные по  $s$   $[\beta_j(G_h(s))]_{s_0}^{(i)}$  сложной функции  $\beta_j(G_h(s))$  — по (8) и (9), если положить  $Z(s) = \beta_j(G_h(s))$ ,  $x(s) = G_h(s)$ .

Значения производных  $\omega_h^{\text{обп}(i)}(s_0)$  могут быть найдены по формуле (6) с заменой функций  $Z(s)$ ,  $x(s)$ ,  $y(s)$  и их производных на функции  $\omega_h^{\text{обп}}(s)$ ,  $\omega_{h,1}^{\text{обп}}(s)$ ,  $\omega_{h,2}^{\text{обп}}(s)$  и их производные соответственно.

4. Аналогично п. 1—3 найти  $(k_r-1)$ -ю производную от (15).

5. Найти производные  $t_h^{(i)}(s_0)$  от ПЛС ФР (12), применяя последовательно (4) к следующим

парам функций:  $\beta_h(s)$  и  $\omega_h^{\text{обп}}(s)$ ,  $[\omega_h^{\text{обп}}(s)\beta_h(s)]$  и

$\omega^{\text{дост}}(s)$ , вычисляя таким образом производные произведения трех функций.

После вычисления производных  $t_h^{(i)}(s_0)$ , ( $i=1, k_r-1$ ) искомая вероятность эрланговского старения  $P_{\text{усл}}$  может быть найдена по формуле (3).

**Заключение**

Рассмотрен подход к вычислению вероятности старения информации, основанный на рекуррентных процедурах расчета производных большого порядка от ПЛС функции распределения времени формирования информационных услуг. Предложенный метод может использоваться для вычисления вероятности старения информации для центров обработки данных и других информационных систем при формировании и контроле выполнения SLA.

**Литература**

1. Советов Б. Я., Цехановский В. В. Информационные технологии. – М.: Юрайт, 2012. – 263 с.
2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Интеллектуальные системы и технологии. – М.: Академия, 2013. – 320 с.
3. Колбанев М. О., Яковлев С. А. Модели и методы оценки характеристик обработки информации в интеллектуальных сетях связи. – СПб.: СПбГУ, 2002. – 230 с.
4. Колбанев М. О., Татарникова Т. М., Воробьев А. И. Модель балансировки нагрузки в вычислительном кластере центра обработки данных // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3(58). С. 37–41.
5. Колбанев М. О., Татарникова Т. М., Воробьев А. И. Модель обработки клиентских запросов // Телекоммуникации. 2013. № 9. С. 42–48.

УДК 681.5

# ЭРГАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИЯХ И АВАРИЯХ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

**А. Е. Городецкий,**

доктор техн. наук, профессор

**В. Г. Курбанов,**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

**И. Л. Тарасова,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Предлагаются математически обоснованные и опробованные на практике методы анализа и принятия решения при эксплуатации энергосистемы в экстремальных условиях. При этом в первую очередь решены проблемы моделирования аварийных ситуаций и быстрого анализа большого объема количественной и качественной информации в условиях неполной определенности. Рассматриваются логико-вероятностные и логико-лингвистические методы, позволяющие обосновывать принятия решений на основе нечеткой модели деградации энергосистемы в процессе эксплуатации. Все они доведены до алгоритмов, готовых для программирования на ЭВМ.

**Ключевые слова** — принятие решения, эргатическая система, логико-вероятностная модель, логико-лингвистическая модель.

## Введение

В настоящее время энергосистемы (ЭС) принято рассматривать как эргатические системы, представляющие собой совокупность объектов, генерирующих, распределяющих и передающих электрическую и тепловую энергию, и обслуживающих их людей, занятых достижением общей цели и включенных в общую сеть обмена информацией. Основные требования к ЭС заключаются в том, чтобы она удовлетворяла в каждый момент времени потребность в количестве электрической и тепловой энергии соответствующего качества; сохраняла свою целостность, т. е. чтобы не было неконтролируемых разделений основных частей ЭС; ограничивала размеры отказа и уменьшала до минимума риск широкого распространения неполадок; быстро восстанавливалась; сохраняла безопасность. Поэтому актуально создание методов и систем, обеспечивающих оценку функционирования оборудования ЭС и возможных неисправностей, предсказание и анализ возникновения и развития предаварийных и аварийных ситуаций.

Однако создание систем, способных подсказать операторам возможные развития аварийных ситуаций и рекомендовать возможные действия для сохранения живучести, наталкивается на отсутствие математически обоснованных и опробованных на практике методов анализа и принятия решения при эксплуатации подобных систем в экстремальных условиях. При этом в первую очередь необходимо решить проблемы моделирования аварийных ситуаций и быстрого анализа большого объема количественной и качественной информации в условиях неполной определенности [1—4]. Указанные проблемы связаны с тем, что чем сложнее система, тем труднее дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении. Такая ситуация определяется термином [5] «принцип несовместимости». Следствие из этого принципа кратко можно выразить так: «Чем глубже мы анализируем реальную задачу, тем неопределеннее становится ее решение». Именно в этом смысле точный количественный анализ поведения сложных систем для практического исследования реальных задач, по-видимому, не-

достаточен. Поэтому при отсутствии принципиальной возможности получить четкую модель системы в целом или каких-либо ее частей целесообразно строить нечеткие модели [6, 7].

Нечеткие задачи моделирования основаны на использовании логических переменных и функций. Логические переменные (ЛП) как аргументы логических функций обычно характеризуются набором атрибутивных данных, среди которых наиболее используемые вероятность ЛП, являющейся в данном случае случайным событием; интервал значений переменной, которому присваивается имя данной ЛП, и функция принадлежности, характеризующая степень принадлежности текущей ЛП к заданному интервалу [6].

Правила вычисления вероятностей описываются в разделах теории вероятности [8], вычисления интервалов изучаются в интервальной математике [9], а вычисление функций принадлежности — в теории лингвистических переменных [10]. Однако при вычислении атрибутов логических функций по известным атрибутам аргументов и построении функционалов качества принимаемых решений, за исключением простейших функций (И, ИЛИ, НЕ), возникают определенные сложности и неоднозначности. Поэтому после построения нечеткой модели ЭС стоит не менее сложная задача создания методов принятия решения. Последние можно охарактеризовать как эргатические методы, в которых учитываются мнения и предпочтения экспертов и обслуживающего персонала.

### Принятие решений на основе бинарных отношений

Процесс поиска оптимального решения в условиях неполной определенности, свойственных эргатическим системам, может быть сведен к решению задачи поиска аппроксимирующего решения или образа  $I_b$ , в каком-то смысле наиболее близком к идеальному  $I$  решению или образу [11]. Решение такой задачи можно свести к поиску наилучшего бинарного отношения  $g_0$ , которое является элементом или подмножеством из множества  $G$  ( $g_0 \subseteq G$ ) и которое отвечает соотношению  $I_b g_0 I$  при выполнении ограничений  $I_b q_i U_i$  и  $I q_i U_i$  ( $q_i \subseteq Q$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ ), где  $G$  и  $Q$  — некоторые фиксированные компактные множества, а  $U_i$  — заданные априори модели или изображения ограничений.

К наиболее часто используемым и легко конструируемым бинарным функциональным отношениям можно отнести следующие:

— оценку по максимальному отклонению мощностей множеств

$$\sum_i x_i - \sum_i y_i = \Delta, \quad (1)$$

где  $x_i=1$  и  $y_i=1$  для ненулевых (непустых) элементов сравниваемых множеств и соответственно  $x_i=0$  и  $y_i=0$  для нулевых (пустых) элементов сравниваемых множеств, а  $\Delta$  — числовая оценка близости;

— оценку по среднеквадратическому отклонению мощностей множеств

$$\sqrt{\left(\sum_i x_i\right)^2 - \left(\sum_i y_i\right)^2} = \delta, \quad (2)$$

где  $\delta$  — числовая оценка близости;

— вероятностную оценку по максимальному отклонению мощностей множеств

$$\sum_i P(x_i=1)x_i - \sum_i P(y_i=1)y_i = \Delta_P, \quad (3)$$

где  $P(\cdot)$  — вероятность;  $\Delta_P$  — числовая вероятностная оценка близости;

— вероятностную оценку по среднеквадратическому отклонению мощностей множеств

$$\sqrt{\left(\sum_i P(x_i=1)x_i\right)^2 - \left(\sum_i P(y_i=1)y_i\right)^2} = \delta_P, \quad (4)$$

где  $\delta_P$  — числовая вероятностная оценка близости.

Использование бинарных функциональных отношений вида (1)–(4) наиболее предпочтительно, так как позволяет ранжировать решения по их близости к идеальному с использованием числовых оценок близости, в которых, как будет показано далее, можно учесть мнения и предпочтения экспертов и обслуживающего персонала.

### Логико-интервальные задачи

При использовании логико-интервальных подходов при принятии решения поиск оптимума может сводиться к задачам математического программирования со следующими скалярными функционалами:

$$J_1 = \sum_{j,i}^{m,n} k_{ji}(b_{ji} - a_{ji}) \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$J_2 = \sum_{j,i}^{m,n} [k_{ji}(b_{ji} - a_{ji}) - c_{ji}]^2 \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$J_3 = \sum_{j,i}^{m,n} k_{ji}[(b_{ji} - a_{ji}) - (b_{ji}^0 - a_{ji}^0)]^2 \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$J_4 = \sum_{j,i}^{m,n} [k_{ji}^b(b_{ji} - b_{ji}^0)^2 + k_{ji}^a(a_{ji} - a_{ji}^0)^2] \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $k_{ji}$ ,  $k_{ji}^b$ ,  $k_{ji}^a$  — коэффициенты предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР), об оптимальности;  $c_{ji}$  — желаемая ЛПР ширина интервала;  $b_{ji}^0$ ,  $a_{ji}^0$  — желаемые ЛПР границы интервалов.

Переходя от количественных шкал к порядковым, мы приходим к задаче математического программирования в порядковых шкалах (МППШ), которая представляет собой задачу выбора такого решения, у которого

$$J_5(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i b_i \rightarrow \max, \quad (9)$$

где  $b_i$  и  $v_i$  — соответственно балльная оценка  $i$ -го параметра, характеризующего качество решения, и его коэффициент значимости.

Если ЛПР является коллектив из нескольких экспертов, то балльные оценки могут оказаться заданными в некоторых диапазонах  $[b_{i1}, b_{i2}]$ . Тогда функционал показателя качества тоже будет получаться в некотором интервале  $J_5(x_i) = [J_{51}, J_{52}]$ , вычисляемом по правилам интервальной алгебры:

$$J_{51} = \sum_{i=1}^m v_i b_{i1}; \quad (10)$$

$$J_{52} = \sum_{i=1}^m v_i b_{i2}, \quad (11)$$

с учетом правил вида:

1) если параметр анализируемой системы  $V_{1i} \geq V_{20}$  — желаемого значения данного параметра, то  $b_1 = 6$ ;

2) если  $V_{1i} \geq V_{10}$  и  $V_{2i} \geq V_{20}$ , то  $b_1 = 5$ ;

3) если  $V_{1i} = V_{10}$  и  $V_{2i} = V_{20}$ , то  $b_1 = 4$ ;

4) если  $V_{1i} \geq V_{10}$  и  $V_{2i} < V_{20}$ , то  $b_1 = 3$ ;

5) если  $V_{1i} \leq V_{10}$  и  $V_{2i} \leq V_{20}$ , то  $b_1 = 2$ ;

6) если  $V_{2i} < V_{10}$ , то  $b_1 = 1$ .

Для выбора наилучшего варианта решения в этом случае необходимо ввести правила их ранжирования. Наиболее простыми могут быть следующие:

7) если  $J_{51}$  наибольший из всех и  $J_{52}$  наибольший из всех, то этот вариант ставится на 1-е место;

8) если только  $J_{52}$  наибольший из всех, то этот вариант ставится на 2-е место;

9) если только  $J_{51}$  наибольший из всех, то этот вариант ставится на 3-е место;

10) если  $J_{51}$  не наибольший из всех и  $J_{52}$  не наибольший из всех, то этот вариант ставится на следующее после 3-го место в соответствии со следующими правилами:

11) если из всех вариантов, удовлетворяющих условию 10,  $J_{51}$  наибольший и  $J_{52}$  наибольший из всех, то этот вариант ставится на 4-е место;

12) если из всех вариантов, удовлетворяющих условию 10, только  $J_{52}$  наибольший из всех, то этот вариант ставится на 5-е место;

13) если из всех вариантов, удовлетворяющих условию 10, только  $J_{51}$  наибольший из всех, то этот вариант ставится на 6-е место;

14) если из всех оставшихся вариантов  $J_{51}$  не наибольший из всех и  $J_{52}$  не наибольший из всех, то этот вариант ставится на следующее после 6-го место в соответствии с правилами 11—13, и т. д.

Задача поиска наилучшего решения еще больше усложняется, если ЛПР, являющееся коллективом из нескольких экспертов, задает интервально не только балльные оценки, но и коэффициенты предпочтения  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}]$ . При этом функционал показателя качества тоже будет получаться в некотором интервале  $J_5(x_i) = [J_{51}, J_{52}]$ , вычисляемом в соответствии с правилами интервальной алгебры по следующим формулам:

$$J_{51} = \sum_{i=1}^m \min_{g,j} (v_{qi} b_{ji}); \quad (12)$$

$$J_{52} = \sum_{i=1}^m \max_{q,j} (v_{qi} b_{ji}). \quad (13)$$

Для выбора наилучшего варианта решения в этом случае также необходимо ввести правила их ранжирования, например вида 7—14.

В отличие от задачи МППШ, оптимизация решений методом обобщенного математического программирования (ОМП) соответствует выбору решения, основанному на сравнении его характеристик с характеристиками идеального решения, а не их параметров. Поэтому метод ОМП значительно сложнее, но по-прежнему представляет собой задачу выбора «наилучшего» (в смысле бинарного отношения  $g_0$ ) среди допустимых решений. Однако эта задача сводится к задаче МППШ, если удастся найти числовые меры близости характеристик сравниваемых систем.

В случае, когда функция выбора, определяемая предпочтениями ЛПР, изменяется в процессе функционирования энергообъекта, необходимо при оптимизации использовать многошаговое обобщенное математическое программирование (МнОМП), позволяющее реализовывать произвольную функцию выбора на конечном множестве вариантов. Поэтому схема МнОМП представляет собой множество следующих друг за другом задач ОМП, каждая из которых отвечает фиксированному предъявлению множества идеальных характеристик  $X$ . Естественно, что вычислительная сложность решения задач МнОМП быстро растет с увеличением числа шагов.

Существенно ускорить процесс принятия решения при логико-интервальном моделиро-

вании сложных систем можно за счет распознавания полученных решений и изображений  $I_r^*$ , т. е. отнесения их к тому или иному классу образов  $C_j^I$  идеального изображения  $I \subseteq C_j^I$ . В этом случае если класс  $C_j^I$ , к которому мы отнесли рассматриваемое изображение  $I_r^*$ , хорошо изучен и для него получено оптимальное решение, то для получения решения для модели  $I_r^*$  можно использовать метод ситуации привычности [12, 13], т. е. искомое решение заменить аналогом.

Весьма вероятно, что для решения этой задачи понадобится построение новой системы логических уравнений, решение которой позволит получить числовые меры близости рассматриваемой модели к известной. В качестве возможных числовых оценок могут быть использованы мощности множеств, количество совпадающих элементов, число групп совпавших элементов и др. Каких-либо рекомендаций по выбору тех или иных оценок в настоящее время предложить нельзя в связи со слабой изученностью подобных моделей. Решение исследователь должен принимать сам, исходя из своих предпочтений, опыта и интуиции [12, 13].

### Логико-вероятностные задачи

При использовании логико-вероятностных подходов при принятии решения каждому решению или объекту можно поставить в соответствие  $m$ -е оптимальное решение лишь с некоторой вероятностью  $P_m$ , вычисляемой по формуле вида

$$P_{i,k+1} = (-2)^0 \sum_{i=1}^n P_{ik} + (-2)^1 \sum_{i,j} P_{ik} P_{jk} + (-2)^2 \sum_{i,j,q} P_{ik} P_{jk} P_{qk} + \dots + (-2)^{N-1} \prod_{i=1}^n P_{ik}, \quad (14)$$

в которой  $P_{ik}$ ,  $P_{jk}$ ,  $P_{qk}$  — вероятности случайных событий (параметров, отношений и т. п.), характеризующих моделируемый объект, которые в процессе моделирования могут быть:

- задаваемыми неизменными числами в диапазоне  $\{0, 1\}$ ;
- задаваемыми функциями времени со значениями в диапазоне  $\{0, 1\}$ ;
- задаваемыми интервально  $\{a_i, b_i\}$  при  $a_i \geq 0$ ,  $b_i \leq 1$ ;
- задаваемыми интервально с изменяющимися во времени интервалами  $\{a_i(t), b_i(t)\}$  при  $a_i \geq 0$ ,  $b_i \leq 1$ ;
- задаваемыми интервально со случайными границами с известными плотностями распределения  $f(a_i)$ ,  $f(b_i)$ ;

— задаваемыми интервально со случайными границами с известными математическими ожиданиями  $M(a_i)$ ,  $M(b_i)$  и дисперсиями  $D(a_i)$ ,  $D(b_i)$ ;

— задаваемыми интервально со случайными границами с известными, изменяющимися во времени плотностями распределения  $f(a_i(t))$ ,  $f(b_i(t))$ , математическими ожиданиями  $M(a_i(t))$ ,  $M(b_i(t))$  и дисперсиями  $D(a_i(t))$ ,  $D(b_i(t))$ ;

— случайными величинами с известными плотностями распределения  $f(P_{ik})$ ;

— случайными величинами с известными математическими ожиданиями  $M(P_{ik})$  и дисперсиями  $D(P_{ik})$ ;

— случайными величинами с изменяющимися во времени плотностями распределения, математическими ожиданиями и дисперсиями;

— задаваемыми в любом из перечисленных сочетаниях.

При этом поиск оптимального решения можно проводить с использованием таких известных вычислительных методов [14], как математическое моделирование в порядковых шкалах, обобщенное математическое программирование или многошаговое обобщенное математическое программирование. Указанные методы базируются на оценке бинарных отношений вида  $I^* q I$ , где  $I$  — идеальное решение. При этом решение  $I^*$  считается оптимальным, если пара

$$(I^*, I) \subseteq q. \quad (15)$$

Отношение  $q$  может быть выражено в виде системы логических уравнений

$$CQ = E \quad (16)$$

или

$$CQ = Y. \quad (17)$$

Вектор  $Q$  имеет размерность  $N$  и в самом общем случае может иметь  $N = 2^n - 1$  компонент вида

$$\langle q_1, q_2, \dots, q_n, q_1q_2, q_1q_3, \dots, q_{n-1}q_n, q_1q_2q_3, \dots, q_{n-2}q_{n-1}q_n, \dots, q_1q_2, \dots, q_{n-1}q_n \rangle. \quad (18)$$

Компоненты  $q_i$  вектора  $Q$  являются ЛП, характеризующими близость объектов и отношений построенного решения  $I^*$  к элементам и отношениям идеального решения  $I$ .

Матрица  $C$  состоит из  $M$  идентификационных строк  $C_i$  [11], имеющих размерность вектора  $Q$  и содержащих элементы 0 и 1 в заданном порядке, например  $C_j = | 0 0 1 1 \dots 0 1 |$ .

Вектор  $E$  — единичный ( $E^T = | 1 1 1 \dots 1 |$ ), имеющий размерность вектора  $Q$ .

Вектор  $Y$  имеет размерность вектора  $Q$ , и его  $y_i$  компоненты могут принимать значение 1 с некоторыми вероятностями  $P_j$ , вычисляемыми че-

рез вероятности компонент  $q_i$  по формулам вида (14).

Тогда возможны следующие ситуации принятия решения  $I^*$ :

— если для  $\forall q_i$  вероятность  $P\{q_i=1\}=1$ , то решение  $I^*$  считается оптимальным, если выполняется условие (16), и неадекватным, если условие (16) не выполняется. В самом простом случае при использовании МППШ можно построить функционал  $J_2(x_i)=\sum v_i b_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), где  $b_i$  и  $v_i$  — балльная оценка  $i$ -го параметра решения и его коэффициент значимости;

— если для  $\forall q_i$  вероятность  $P\{q_i=1\}=0$ , то модель  $I^*$  считается неопределенной и отношение  $q$  построено неправильно;

— если  $\exists q_i$ , для которого вероятность  $0 < P\{q_i=1\} < 1$ , то решение  $I^*$  считается оптимальным, если  $\sum P_i \geq A$ ,  $i=1, 2, \dots, M$ , для решений уравнений (17), где  $A$  — экспертная оценка оптимальности, или решение  $I_i^*$  — наилучшее из всех рассматриваемых, если для него  $\sum P_i = \max$ ,  $i=1, 2, \dots, M$ .

Последняя ситуация является наиболее типичной для эргатических систем. При большом количестве логических слагаемых в функции  $y_i$  процедура вычисления вероятности  $P_i$  по формуле (14) требует больших затрат времени, и в ряде случаев даже использование для этих целей современных ЭВМ с традиционной архитектурой приводит к неприемлемым затратам машинного времени. Однако структура уравнения (14) позволяет легко применять для целей вычисления указанных вероятностей ЭВМ с параллельной архитектурой вычислений, например нейронные сети.

Кроме того, известно [15], что при определенных условиях большей частью слагаемых в уравнении (14) можно пренебречь из-за их малого значения. По существу задача состоит в определении суммы первых 7—15 слагаемых в уравнении (14), которые определяют основной вклад в значение вероятности, рассчитанное по формуле (14). Остальными слагаемыми можно пренебречь, тем более что вероятности исходных ЛП  $q_i$  обычно вычисляются с определенными погрешностями и, соответственно, значение вероятности, полученное из формулы (14), будет тоже иметь погрешность [16]. Более того, при поиске наилучшей модели нас интересуют не сами значения вероятностей решений  $y_i$ , получаемых из системы уравнений (17), а модель с наибольшей суммой вероятностей  $P_i$ .

Наиболее просто осуществить поиск оптимального решения, если удастся сформулировать функционал из атрибутивной части ЛП, который требуется минимизировать либо максимизировать. В частности, поиск оптимума сводится

к задачам математического программирования с критерием качества вида

$$J_1 = \sum_{j,i} k_{ji} P\{u_j(t_i) = 1\} \rightarrow \max, \quad (19)$$

где  $k_{ji}$  — назначаемые ЛПР весовые коэффициенты.

При использовании МППШ необходимо искать максимум функционала

$$J_3(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i b_i P_i^y \quad (20)$$

при соблюдении ограничений

$$a_i \geq a_{i \min}, \quad i=1, \dots, m, \quad (21)$$

где  $a_{i \min}$  — минимально допустимая оценка  $i$ -го параметра, и

$$P_i^z \geq P_{i \min}, \quad i=1, \dots, m, \quad (22)$$

где  $P_{i \min}$  — минимально допустимая вероятность ЛП  $z_i$ , полученных из решения уравнений ограничений вида

$$C_j Q = Z. \quad (23)$$

Вектор  $Z$  имеет размерность вектора  $Q$ , и его  $z_i$  компоненты могут принимать значение 1 с некоторыми вероятностями  $P_i$ , вычисляемыми через вероятности компонент  $q_i$  по формулам вида (14).

Задача МППШ еще более усложняется, если те или иные балльные оценки  $b_{ij}$  и  $a_{ij}$  выставляются лицами, принимающими и ограничивающими решения, с некоторыми соответствующими вероятностями  $P_{ij}^b$  и  $P_{ij}^a$ . В этом случае необходимо искать решение с максимальным значением

$$J_4(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i P_i^y \sum_{j=1}^n b_{ij} P_{ij}^b \quad (24)$$

при соблюдении ограничений (21) и

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} P_{ij}^a \geq A_{i \min}, \quad i=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, n, \quad (25)$$

где  $A_{i \min}$  — минимально допустимая вероятностная оценка для  $i$ -го параметра.

Возможны ситуации, когда поиск оптимального решения соответствует выбору наилучшего на основании сравнения его характеристик с характеристиками идеального решения, а не их параметров. Тогда можно использовать метод ОМП, который значительно сложнее МППШ.

Формально записи задач ОМП имеют следующий вид.

**Задача 1.** Если  $\forall q_i, P(q_i)=1$ , то

$$f_0(x_0)g_0 f_0(x_s) \text{ при } f_j(x_0)g_j u_j, f_j(x_s)g_j u_j,$$

$$j=1, \dots, r; (x_0, x_3) \in G \subseteq R^n, \quad (26)$$

где  $f_i(x_0)$  и  $f_i(x_3)$  — некоторые задаваемые функции в  $R_j^m$  предпочтения ЛПП;  $i=0, 1, \dots, r$ ;  $u_j$  — фиксированный вектор в  $R_j^m$  ограничений, задаваемых ЛПП;  $g_j, j=0, 1, \dots, r$  — бинарные отношения на  $G \subseteq R^n$ .

В этом случае оптимальной будет та единственная модель  $x_0$ , для которой выполняются условия (26).

**Задача 2.** Если  $\exists q_i, P(q_i) < 1$ , то

$$f_0(x_0)g_0f_0(x_3) \rightarrow \text{opt при } f_j(x_0)g_ju_j, f_j(x_3)g_ju_j, \\ j=1, 2, \dots, r; (x_0, x_3) \in G \subseteq R^n. \quad (27)$$

В этом случае будет несколько решений, удовлетворяющих условию (26) с разной степенью вероятности, и для выбора оптимального требуется провести анализ других лингвистических атрибутов ЛП  $q_i$ .

В задаче 1 ОМП оптимизация сводится к построению оптимальных бинарных отношений  $g_j$ .

В задаче 2 ОМП при поиске оптимального решения после построения бинарных отношений  $g_j$  и отбора претендентов на оптимальность, исходя из задаваемых граничных вероятностей, требуется дополнительно анализировать сложные лингвистические выражения, являющиеся атрибутами ( $w_i$ ) или формируемые из атрибутов ( $w_i$ ) ЛП  $q_i$ , являющихся компонентами вектора  $\mathbf{Q}$  в логических выражениях (16) и (17), характеризующих оптимальность ( $g_0$ ) и соответствующие ограничения ( $g_j$ ).

При этом если указанные лингвистические выражения могут быть сведены к логическим выражениям вида

$$\mathbf{F}_i = C_0^i \mathbf{W}; \quad (28)$$

$$\mathbf{S}_i = C_j^i \mathbf{W}, \quad (29)$$

где  $\mathbf{F}_i$  — вектор ЛП  $y_j$ , характеризующих оптимизируемые решения;  $\mathbf{S}_i$  — вектор ЛП  $z_j$ , характеризующих ограничение характеристик;  $\mathbf{W}$  — вектор ЛП  $x$ , компонентами которых являются ЛП  $w_i$ , атрибутами которых могут быть только их вероятности  $P_i^w$ ;  $C_0^i$  и  $C_j^i$  — идентификационные строки, содержащие элементы 0 и 1 в заданном порядке (например:  $C_0^i = |1\ 0\ 0\ 1\ 0\ \dots\ 1|$ , а  $C_j^i = |0\ 1\ 1\ 0\ \dots\ 0|$ ); размерности вектора  $\mathbf{W}$  и строк  $C_0^i, C_j^i$  совпадают, тогда решение может быть автоматизировано программными средствами искусственного интеллекта.

Алгоритм оптимизации в задаче 2 ОМП содержит следующие этапы.

1. Построение бинарных отношений  $f_0(x_0)g_0f_0(x_3), f_j(x_0)g_ju_j, f_j(x_3)g_ju_j$ .

2. Построение логических выражений  $C_0\mathbf{Q}=\mathbf{Y}, C_j\mathbf{Q}=\mathbf{Z}$ .

3. Вычисление вероятностей  $P_i^y$  и  $P_i^z$ .

4. Если оценки близости характеристик решения к эталону  $b_i$  и оценки ограничивающих характеристик  $a_i$  задаются ЛПП точно, то отбор решений, для которых выполняются следующие условия:

$$a_i \geq a_{i \min}, i=1, \dots, m; P_i^z \geq P_{i \min};$$

$$J(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i b_i P_i^y \geq J_{i \min}.$$

5. Если оценки близости характеристик решения к эталону  $b_i$  и оценки ограничивающих характеристик  $a_i$  задаются ЛПП не точно, с некоторыми соответствующими вероятностями  $P_{ij}^b$  и  $P_{ij}^a$ , то отбор решений, для которых выполняются следующие условия:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} P_{ij}^a \geq A_{i \min}; P_i^z \geq P_{i \min}, i=1, \dots, m;$$

$$J(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i P_i^y \sum_{j=1}^n b_{ij} P_{ij}^b \geq J_{i \min}, i=1, \dots, m, \\ j=1, \dots, n.$$

6. Для отобранных решений построение логических выражений

$$\mathbf{F}_i = C_0^i \mathbf{W}; \mathbf{S}_i = C_j^i \mathbf{W}.$$

7. Вычисление вероятностей  $P_i^f, P_i^s$ .

8. Если оценки близости  $b_i$  и ограничивающие оценки  $a_i$  задаются ЛПП точно, то поиск решения, для которого

$$J(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i b_i P_i^f \rightarrow \max,$$

при выполнении следующих условий:

$$a_i \geq a_{i \min}, i=1, \dots, m; P_i^s \geq P_{i \min}, i=1, \dots, m.$$

9. Если оценки близости  $b_i$  и ограничивающие оценки  $a_i$  задаются ЛПП не точно, с некоторыми соответствующими вероятностями  $P_{ij}^b$  и  $P_{ij}^a$ , то поиск решения, для которого

$$J(x_i) = \sum_{i=1}^m v_i P_i^f \sum_{j=1}^n b_{ij} P_{ij}^b \rightarrow \max,$$

при выполнении следующих условий:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} P_{ij}^a \geq A_{i \min}; P_i^s \geq P_{i \min}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n.$$

Однако эти задачи ОМП для логико-вероятностного подхода сводятся к задаче МППШ, если

удаётся найти числовые меры близости характеристик сравниваемых систем.

В случае, когда функция выбора (ФВ), определяемая предпочтениями ЛПР, изменяется в процессе функционирования системы, необходимо при оптимизации использовать МнОМП, позволяющее реализовывать произвольную ФВ на конечном множестве вариантов.

### Логико-лингвистические задачи

При использовании логико-лингвистических подходов при принятии решения поиск оптимума также сводится к поиску наилучшего бинарного отношения  $g_0$ , которое является элементом или подмножеством из множества  $G$  ( $g_0 \subseteq G$ ) и отвечает соотношению  $I_b g_0 I$  при выполнении ограничений  $I_b q_i U_i$  и  $I q_i U_i$  ( $q_i \subseteq Q$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ), где  $G$  и  $Q$  — некоторые фиксированные компактные множества, а  $U_i$  — заданные априори модели или изображения ограничений, при этом решение  $I^*$  считается оптимальным, если пара  $(I^*, I) \in q$ .

Отношение  $q$  может быть выражено в виде системы логических уравнений вида (16) и (17), но в данной задаче компоненты  $q_i$  вектора  $Q$  являются ЛП, характеризующими близость объектов и отношений построенной модели  $I^*$  к элементам и отношениям идеальной модели  $I$  не точно, а в зависимости от значений функций принадлежности этих ЛП.

Матрица  $C$  и вектор  $E$  такие же, как в логико-вероятностных задачах.

Вектор  $Y$  имеет размерность вектора  $Q$ , и его  $y_i$  компоненты могут принимать значение 1 с некоторыми значениями функций принадлежности  $\mu_i$ , вычисляемыми через значения функций принадлежности компонент  $q_i$  по описанному ранее алгоритму.

Тогда возможны следующие ситуации принятия решения об оптимальности  $I^*$ :

— если для  $\forall q_i$  значение функции принадлежности  $\mu\{q_i=1\}=1$ , то решение  $I^*$  считается оптимальным, если выполняется условие (16), и неоптимальным, если условие (16) не выполняется;

— если для  $\forall q_i$  значение функции принадлежности  $\mu\{q_i=1\}=0$ , то решение  $I^*$  считается неопределённым и отношение  $q$  построено неправильно;

— если  $\forall q_i$ , для которого значение функции принадлежности  $0 < \mu\{q_i=1\} < 1$ , то решение  $I^*$  считается оптимальным, если для компонент  $y_i$  в системе уравнений (17) имеем  $\sum \mu_i \geq A$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ , где  $A$  — экспертная оценка адекватности, или решение  $I_i^*$  наилучшее из всех рассматриваемых, если для него  $\sum \mu_i = \max$ .

Последняя ситуация является наиболее типичной при логико-лингвистической оценке

эргатических систем. При большом количестве логических слагаемых в функции  $y_i$  процедура вычисления значения функции принадлежности  $\mu_i$  требует больших затрат времени, и в ряде случаев даже использование для этих целей современных ЭВМ с традиционной архитектурой приводит к неприемлемым затратам машинного времени. Поэтому для вычислений  $\mu_i$  целесообразно использовать ЭВМ с параллельной архитектурой вычислений, например нейронные сети.

Наиболее просто поиск оптимального решения осуществляется, если удастся сформулировать функционал из атрибутивной части ЛП, который требуется минимизировать либо максимизировать. В частности, поиск оптимального решения сводится к задачам математического программирования, когда осуществляется поиск решения  $u_j(t_i)$ , имеющего максимальные значения функций принадлежности логических функций  $u_j(t_i)$ . Тогда критерий качества можно выразить следующим образом:

$$J_1 = \sum_{j,i}^{m,n} k_{ji} \mu(u_j(t_i)) \rightarrow \max, \quad (30)$$

где  $k_{ji}$  — назначаемые ЛПР весовые коэффициенты.

При поиске наилучшего в том или ином смысле или оптимального решения с использованием логико-лингвистического подхода может возникнуть ситуация, когда не удастся сформулировать скалярный функционал, характеризующий качество решения, который требуется минимизировать либо максимизировать. Для решения такой задачи можно перейти от моделей, требующих задания функционалов, определяющих цели и ограничения задачи, к моделям, учитывающим предпочтения лиц, участвующих в выборе решения, наиболее близкого к идеальному из множества альтернатив. В этом случае мы переходим от количественных шкал к порядковым, т. е. приходим к задаче МППШ, которая представляет собой задачу, схожую с задачей МППШ для логико-вероятностного подхода, только теперь неопределённости описываются не вероятностями, а функциями принадлежности.

Аналогично возможно использование при логико-лингвистическом подходе ОМП и МнОМП с заменой вероятностей на функции принадлежности. При этом, естественно, алгоритм вычисления функций принадлежности значительно сложнее, чем алгоритм вычисления вероятностей.

### Заключение

При оценке функционирования оборудования ЭС, их возможных неисправностей, предсказании и анализе возникновения и развития пред-

аварийных и аварийных ситуаций целесообразно использовать нечеткие модели, основанные на применении логических переменных и функций, характеризующихся набором атрибутивных данных, среди которых наиболее используемые: вероятность ЛП, являющейся в данном случае случайным событием; интервал значений переменной, которому присваивается имя данной ЛП, и функция принадлежности, характеризующая степень принадлежности текущей ЛП к заданному интервалу. Процесс поиска оптимального решения в этом случае можно свести к поиску наилучшего бинарного отношения.

Использование бинарных функциональных отношений логико-интервального, логико-веро-

ятного или логико-лингвистического типов наиболее предпочтительно, так как позволяет сформулировать эргатические методы, обеспечивающие ранжирование решения по их близости к идеальному с применением числовых оценок близости, в которых можно учесть мнения и предпочтения экспертов и обслуживающего персонала. При этом могут быть использованы такие вычислительные методы, как задача математического программирования в порядковых шкалах, обобщенное математическое программирование и многошаговое обобщенное математическое программирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-07-00318-а) и Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16).

## Литература

1. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Экспертная система анализа и прогнозирования аварийных ситуаций в энергетических установках // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 59–63.
2. Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Логико-вероятностные методы моделирования плохо формализуемых процессов и систем // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012. № 6(131). С. 255–257.
3. Курбанов В. Г. Метод оценки надежности сложных технических систем // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4. С. 75–76.
4. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Имитационное моделирование развития аварийных ситуаций в энергетических установках // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 38–42.
5. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Inform. Contr. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
6. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. – СПб.: Изд-во Политехн. унта, 2010. – 336 с.
7. Курбанов В. Г., Городецкий А. Е. Логический метод для управления электроприводами контррефлектора // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1. С. 23–26.
8. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – М.: Мир, 1964. Т. 1. 500 с.; 1967. Т. 2. 752 с.
9. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. – М.: Мир, 1987. – 360 с.
10. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 168 с.
11. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности // Информационно-управляющие системы. 2008. № 5. Ч. 1. С. 10–14; № 6. Ч. 2. С. 22–25.
12. Gorodetsky A. E. Fuzzy Decision Making in Design on the Basis of the Habituality Situation Application // Fuzzy Systems Design. Social and Engineering Applications/ed. Leonid Reznik, Vladimir Dimitrov, Janusz Kacprzyk. – N. Y.: Physica-Verlag, 1998. P. 63–73.
13. Городецкий А. Е. Об использовании ситуации привычности для ускорения принятия решения в интеллектуальных информационно-измерительных системах // Физическая метрология: теоретические и прикладные аспекты. – СПб.: КН, 1996. С. 141–151.
14. Юдин Д. Б. Вычислительные методы теории принятия решений. – М.: Наука, 1989. – 320 с.
15. Городецкий А. Е., Дубаренко В. В. Комбинаторный метод вычисления вероятности сложных логических функций // ЖВМ и МФ. 1999. Т. 39. № 7. С. 1246–1249.
16. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г., Кучмин А. Ю. Об одном методе вычисления вероятностей логических функций // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 2–7.

УДК 004.94:681.518.3

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОЛУНАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТЕНДАХ

**Ф. Ф. Буканов,**

канд. техн. наук, доцент

**В. В. Сбродов,**

канд. техн. наук, доцент

**С. Г. Сафронов,**

аспирант

Самарский государственный технический университет

*Приводятся описание стендового оборудования, методика, результаты компьютерного моделирования и полунатурных испытаний оптико-электронных систем для комплексов дистанционного мониторинга и навигации подвижных объектов. При создании стендов ставилась основная задача — достижение высокой точности стендового оборудования, дающей возможность определить предельные параметры разрабатываемых систем. Показано, что экспериментальная стендовая отработка пассивных оптико-электронных космических систем наблюдения поверхности Земли позволяет оценивать их характеристики в диапазоне изменений внешних условий эксплуатации до проведения конструкторско-доводочных испытаний.*

**Ключевые слова** — компьютерное моделирование, полунатурные испытания, оптико-электронная система, система технического зрения, обработка изображений, распознавание, корреляционно-экстремальная система.

## Введение

В настоящее время оптико-электронные системы (ОЭС), предназначенные для получения, обработки и анализа визуальной информации о наблюдаемой сцене, нашли широкое распространение в различных областях науки и техники. Оптико-электронные системы используются в качестве функциональной аппаратуры в космических аппаратах (КА) дистанционного зондирования Земли при проведении исследований природных ресурсов, экологического мониторинга, оценки последствий антропогенных и природных катастроф и т. д. Системы технического зрения нашли широкое применение в промышленных и транспортных роботах в качестве элементов комплексов управления и навигации подвижных объектов различного назначения [1–3].

Процесс создания ОЭС включает три этапа исследований: компьютерное (математическое) моделирование, физико-математическое моделирование и проведение комплексной экспериментальной отработки — конструкторско-до-

водочные (летно-конструкторские) испытания системы в целом. Первый и второй этапы связаны с разработкой более или менее точных математических моделей наблюдаемой сцены и алгоритмов обработки визуальной информации с частичным использованием аппаратной реализации отдельных элементов системы. Эти этапы позволяют оценить эффективность используемых алгоритмов, а также реализуемость системы с учетом ограничений, накладываемых состоянием существующей элементной базы.

Наиболее полные и точные данные о технических и эксплуатационных характеристиках дают конструкторско-доводочные испытания с использованием макетных или экспериментальных образцов разрабатываемых систем в условиях реального применения. Проведение комплексных конструкторско-доводочных испытаний КА сопряжено с организационно-техническими проблемами и требует значительных материальных затрат. При исследовании системы, обладающей более высокими точностными характеристиками, чем бортовые измерительные системы КА, в ходе проведения испытаний

не удается оценить потенциальные возможности разрабатываемой системы.

Разработчики ОЭС для комплексов управления и навигации подвижных объектов проводят отработку макетных и экспериментальных образцов на специально созданных для этих целей стендах, которые обеспечивают максимально возможную имитацию реальных условий эксплуатации и имеют в своем составе измерительную аппаратуру с более высокими точностными характеристиками, чем исследуемая система. Например, фирмой Martin Marietta Aerospace (США) был создан специальный автоматизированный стенд для отработки и испытаний ОЭС (в том числе инфракрасных типа LANTIRN, TADS и др.). Стенд имеет замкнутую телевизионную систему, масштабный макет местности и систему имитации траекторного движения носителя [4]. Из числа отечественных разработок можно отметить стенд натуральных испытаний ОЭС на базе открытой оптической трассы с железнодорожным полотном, разработанный ФГУП НИИКИ ОЭП [5], а также комплекс полунатурного моделирования (КПМ) ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС» [6] и динамический стенд «Вектор» ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [7]. В основе статьи — опыт сотрудничества СамГТУ с ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», накопленный при проведении прикладных научно-исследовательских разработок.

### Описание и структура стендов

В целях реализации моделирования и комплексной экспериментальной отработки ОЭС для

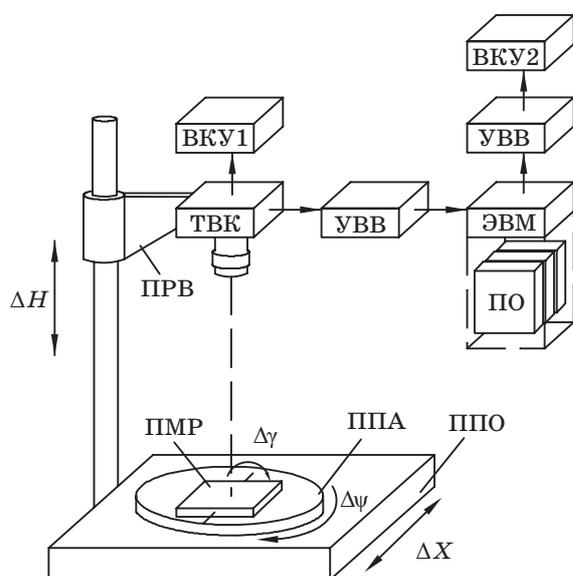
космических и летательных аппаратов были созданы стенд экспериментальных исследований (СЭИ) и стенд комплексной отработки (СКО).

При разработке СЭИ ставилась основная задача экспериментального исследования влияния геометрических, масштабных и других искажений текущего информационного массива на эффективность корреляционного алгоритма в зависимости от изменения углов ориентации, угла визирования, масштаба (высоты наблюдения), угла засветки. Моделирование процесса наблюдения, близкого к реальным условиям, и проведение экспериментальных исследований позволяют:

- обосновать требования к оптической системе и приемнику изображения;
- сформулировать требования к качеству и объему эталонной информации;
- определить область допустимых искажений, при которых корреляционный алгоритм сохраняет свою работоспособность.

В состав стенда входят (рис. 1): телевизионная камера ТВК (рис. 2); азимутальная поворотная платформа ППА; однокоординатная подвижная платформа ППО; ракурсный поворотный механизм с предметным столом ПМП; вертикальная подвижная рама ПРВ; видеоконтрольные устройства ВКУ1 и ВКУ2; устройства ввода-вывода информации УВВ; ЭВМ обработки данных и управления; специальное программное обеспечение ПО.

Диапазон вертикального хода подвижной рамы (300÷1200 мм), комплект переходных колец и сменных насадок для оптических си-



■ Рис. 1. Стенд экспериментальных исследований



■ Рис. 2. Телевизионная камера на ПЗО

стем с различными фокусными расстояниями (20—135 мм), а также формат размещаемого на предметном столе аэрокосмического фотоизображения (280×240 мм) позволяют имитировать условия наблюдения ОЭС с полем зрения до 20° и разрешением 5—100 м на местности для низкоорбитальных КА (350—600 км) при освещенности 0,45—45 Вт/м<sup>2</sup>. Предметный стол ПМР, осуществляющий вращение в диапазоне угла ракурса ±35° с точностью ручной установки ±1°, ППА, разворачивающаяся в пределах ±180° с точностью ±2" (при отсчете по лимбу), обеспечивают моделирование условий наблюдения при изменении ориентации КА (тангаж, крен и рыскание). ППО, перемещающаяся (непрерывно или дискретно в диапазоне ±110 мм с точностью 0,01 мм) в автоматическом (по командам ЭВМ) или ручном режиме, дает возможность моделировать «смаз» изображения, возникающий при движении КА относительно подстилающей поверхности.

Имитация условий наблюдения и получение статистических характеристик исследуемых алгоритмов распознавания осуществлялись путем ручной выставки задаваемых параметров СЭИ с отображением текущей информации на ВКУ1. Автоматический режим ввода и обработки изображения обеспечивает специальное ПО ЭВМ, включающее в себя алгоритмы низкочастотной фильтрации, бинарного кодирования и вычисления функции взаимной корреляции (ВКФ) с отображением результатов на ВКУ2. После записи последовательностей изображений, имеющих различные значения искажений, ЭВМ производит расчет и выдачу результатов вычислений ВКФ в графической форме. При исследовании влияния фона изображения на работу корреляционного алгоритма использовались фотоматериалы с низкочастотными, среднечастотными и высокочастотными пространственными спектрами.

Стенд комплексной отработки (рис. 3) предназначен для отладки функционирования основных блоков автономных исследуемых систем (АИС) КА, проводимой на этапе комплексных конструкторско-доводочных испытаний. Стенд обеспечивает математическое моделирование работы блока обработки информации и сопряжение ОЭС с бортовой аппаратурой КА при различных режимах функционирования, а также моделирует внешние условия, соответствующие реальным условиям эксплуатации ОЭС, имитация которых позволяет оценить точность и основные эксплуатационные характеристики разрабатываемых систем. К таким условиям относятся:

- параметры относительного движения носителя и наблюдаемой сцены;



■ Рис. 3. Внешний вид стенда комплексной отработки

- параметры реальных систем управления движением и навигации (моделирование погрешностей предварительных целеуказаний комплекса управления носителя);

- уровень линейного разрешения элемента наблюдаемой сцены, соответствующий 10—20 м на местности;

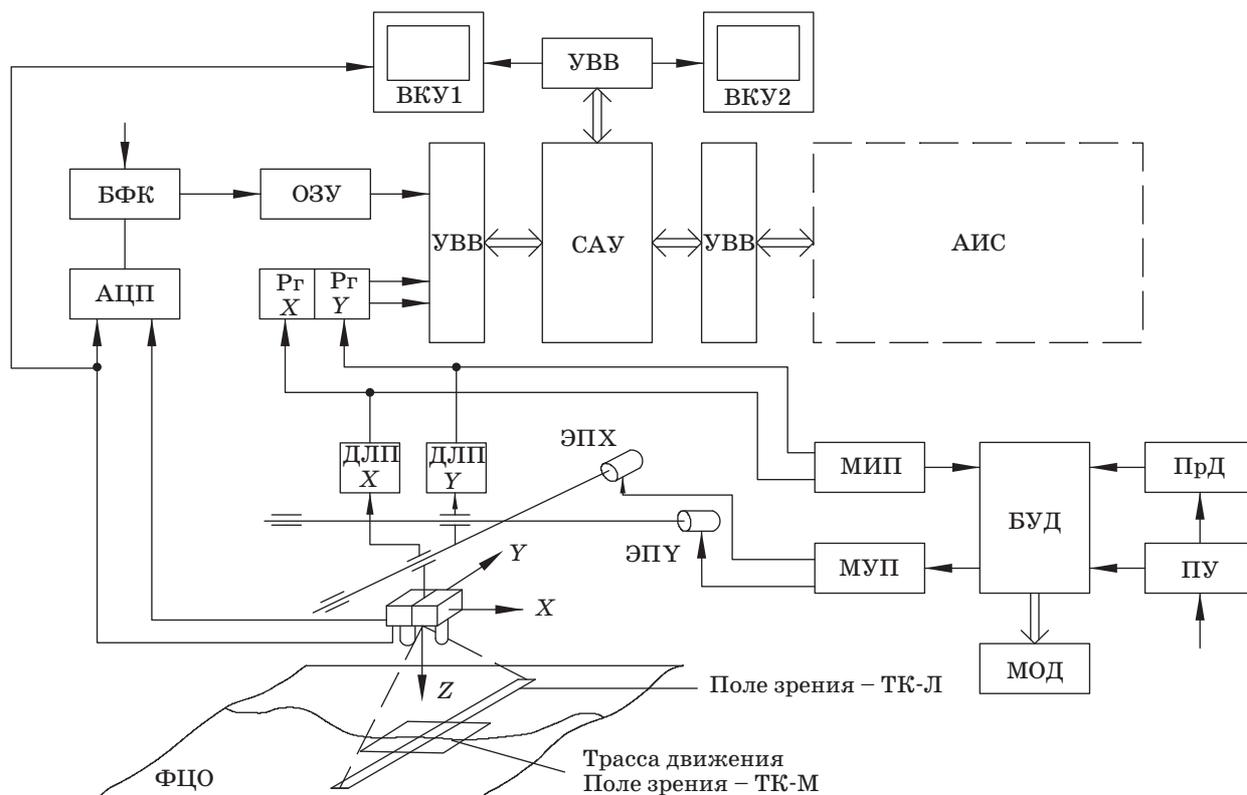
- пространственно-частотные характеристики подстилающей поверхности;

- энергетика фокальной плоскости.

В условиях, частично моделирующих натурные испытания, осуществляется практически полная имитация работы основных подсистем управления и динамических условий наблюдения, которые позволяют исследовать их влияние на работу АИС во всех режимах функционирования. Узлы и блоки экспериментального образца АИС, системы анализа и управления выполнены в виде модулей приборного интерфейса ЭВМ.

В базовый состав СКО (рис. 4) входят: двухкоординатная подвижная платформа — имитатор орбитального движения с блоком телекамер, построенных на базе линейного ТК-Л и матричного ТК-М прибора с зарядовой связью (ПЗС) с комплектом переходных колец и сменных насадок для оптических систем (фокус 20—135 мм); управляемые приводы постоянного тока ЭП X, ЭП Y; датчики линейных перемещений ДЛП X и ДЛП Y, имитирующие работу автоматической системы навигации; модуль управления приводами МУП; модуль измерения линейного положения МИП; блок управления движением БУД; ручной пульт управления ПУ; модули отображения данных МОД, текущей ВКУ1 и служебной ВКУ2 информации; программатор движения ПрД; планшет с фоно-целевой обстановкой ФЦО.

В структуру СКО, формируемую после отработки алгоритмического обеспечения на СЭИ и создания экспериментального макета АИС,

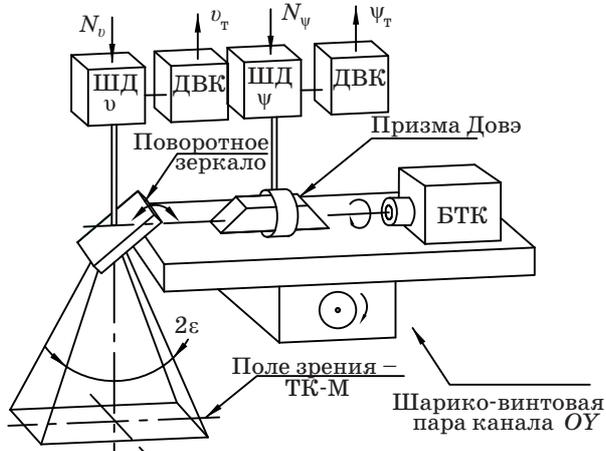


■ Рис. 4. Структура стенда комплексной обработки

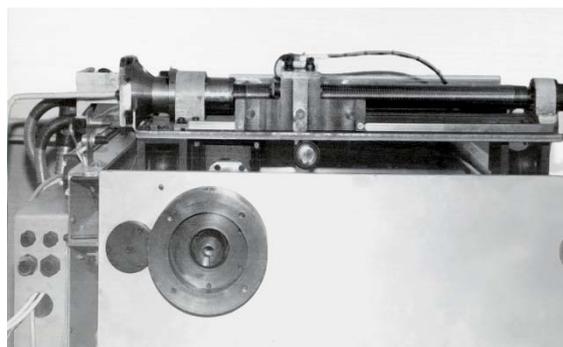
входят (см. рис. 4): аналого-цифровой преобразователь АЦП; блок формирования кадра БФК; оперативное запоминающее устройство ОЗУ; автономная исследуемая система АИС; устройства ввода-вывода УВВ; регистры текущих координат  $P_x$  и  $P_y$ ; система анализа и управления САУ на базе ЭВМ, включающая в себя ПО математи-

ческой модели бортового комплекса управления (ВКУ) и системы управления движением КА.

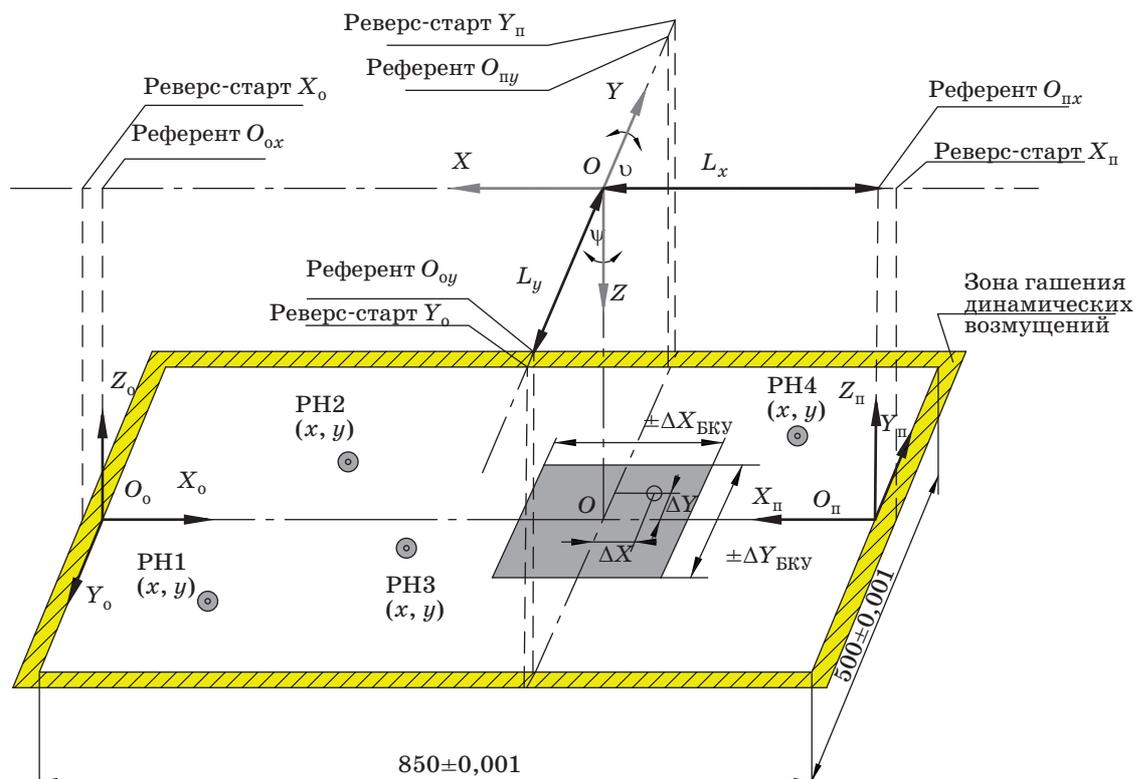
Независимые перемещения платформы (0,1–50 мм/с) в продольном (ось  $Ox$ : 850 мм) и поперечном (ось  $Oy$ : 500 мм) направлениях с точностью позиционирования  $\pm(2 \cdot 10^{-6})$  м обеспечивают измерение значений текущих координат с погрешностью  $\Delta X = \Delta Y = \pm(4 \cdot 10^{-6})$  м. На подвижной платформе смонтировано устройство, позволяющее изменять положение линии визирования по каналам тангажа и рыскания (рис. 5, 6), следящее зеркало которого перенеце-



■ Рис. 5. Структура имитатора орбитального движения



■ Рис. 6. Подвижная платформа



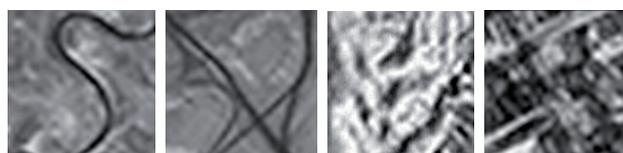
■ Рис. 7. Схема размещения модуля имитации орбитального движения и ФЦО

ливают линию визирования в тангажной плоскости в пределах  $\pm 30^\circ$  с точностью  $\pm 2'$ . Изменение ориентации изображения наблюдаемой сцены по каналу рыскания с точностью  $\pm 2'$  обеспечивает призма Довэ. Управление зеркалом и призмой Довэ производится шаговыми двигателями ШД, на которые подаются программные значения положения  $N_\psi$  и  $N_\psi$ , а с оптических датчиков вал—код ДВК снимаются текущие значения углов наклона зеркала  $\psi_T$  и призмы Довэ  $\psi_T$ . Комплексное техническое решение, примененное для имитации работы каналов тангажа и рыскания КА, позволило получить характеристики стенда, в 2—3 раза превышающие достигнутые показатели точности ориентации КА [8].

Планшет ФЦО, выполненный на специальной раме (рис. 7), позволяет изменять высоту относительно блока телекамер ( $H_1=350$  мм,  $H_2=700$  мм,  $H_3=1400$  мм), а также размещать носители на прозрачной основе (позитивы, негативы) и фотоизображения на непрозрачном носителе, имеющие разные масштабы. Система подсветки ФЦО моделирует суточные и сезонные изменения освещенности. Такая конструкция ФЦО совместно с подвижной платформой обеспечивает имитацию движения реального изображения местности как автономной (фокус 50—150 мм), так и штатной (фокус более 2 м) оптиче-

ской аппаратуры в реальном масштабе для высот полета КА 350—600 км [8].

Две неподвижные системы координат планшета ФЦО (прямая  $X_\Pi O_\Pi Y_\Pi$  и обратная  $X_0 O_0 Y_0$ ), связанные с референтами ДЛП, по которым производится обнуление их показаний, обеспечивают циклический режим работы стенда. Референты ДЛП X, ДЛП Y, выставленные на расстоянии 25 мм от концевых выключателей питания электроприводов, позволяют организовать необходимую зону гашения динамических возмущений и исключить из обработки участки ФЦО, на которых подвижная платформа модуля имитации орбитального движения перемещается с ускорением (см. рис. 7). По направлению движения платформы на планшете ФЦО располагается фотоматериал с выбранными опорными ориентирами (рис. 8) районов наблюдения PH1—PH4, координаты которых задаются в прямой и обрат-



■ Рис. 8. Опорные ориентиры

ной системах координат относительно их центров в виде приращений ( $\Delta X$ ;  $\Delta Y$ ).

Опорные ориентиры (дороги, реки, строения и т. д.) представляют собой изображения протяженных объектов характерной формы. Например, размеру изображения ориентира  $6 \times 6$  мм на снимке соответствует его размер на земной поверхности  $550 \times 550$  м. Ориентиры отбираются с использованием первичных информационных материалов [9], при этом основным критерием выбора ориентира является наличие глобального максимума и низких значений уровней боковых максимумов. Ориентиры образуют библиотеку эталонов, необходимый состав которой определяется работой алгоритма распознавания аппаратного бинарного коррелятора в режимах обнаружения и наведения АИС [3].

Вспомогательная аппаратура стенда обеспечивает предварительный выбор ориентиров, оцифровку видеоинформации, запись цифрового изображения ориентира в библиотеку эталонов ОЭС и фиксацию истинного положения ориентира относительно референтных точек стенда с точностью  $\pm 2$  мкм.

Визуальное отображение текущих значений координат подвижной платформы, выводимых на дисплей МОД, позволяет контролировать ход выполнения программ движения, задаваемых с ручного ПУ или ПрД. Программами функционирования стенда также предусмотрен визуальный контроль текущей информации и эталонных информационных массивов, отображаемых на мониторах ВКУ1 и ВКУ2.

### Методика проведения и результаты экспериментальных исследований

При исследованиях проводилась оценка работоспособности АИС с использованием космических снимков различных типов поверхности: города, ландшафта, сельской местности. В качестве опорных ориентиров, предназначенных для распознавания, выбирались специфические фрагменты снимков [9] «Река», «Развилка», «Хребет», «Город» размером  $32 \times 32$  элемента разложения (см. рис. 8).

Методика составлялась на основе оценки влияющих факторов и моделирования их параметров [1, 10]. Решение о наличии объекта или об отсутствии его на изображении принимается в соответствии с критерием Неймана — Пирсона, при использовании которого минимизируется условная вероятность пропуска объекта  $P_{\bar{D}}$  и обеспечивается максимальная вероятность правильного обнаружения  $\max P_D$ , но с условием, что вероятность ложной тревоги  $P_F$  не больше

заданного значения [11]. Условием обеспечения качества обнаружения является превышение значения глобального максимума ВКФ уровня порога  $R > R_0$ . Порог  $R_0 = 0,75$  определяется значением вероятности ложной тревоги  $P_F < 10^{-5}$  путем статистического моделирования [12].

Использована модель текущего искаженного изображения, снимаемого с матричного ПЗС [10]:

$$F(i, j) = \frac{a}{e+1} \left\{ \sum_0^e \left[ G(i+e, j) + b \frac{1}{M \times N} \times \sum_1^M \sum_1^N G(i+e, j) \right] \right\} + H(i, j),$$

где  $G(i, j)$  — исходное неискаженное (эталонное) изображение (ЭИ);  $F(i, j)$  — искаженное (текущее) изображение (ТИ).

Выбор параметров модели осуществлялся из следующих соображений. При изменении зенитных углов Солнца в пределах  $i = 10 \div 80^\circ$  и углов ракурса  $\theta = 0 \div 60^\circ$  коэффициент яркостных искажений принимает значения  $a = E_{ТИ}/E_{ЭИ} = (0,1 \div 2,0)$  [10], где  $E$  — освещенность. Контрастные искажения, обусловленные влиянием дымки и рассеивания излучения в атмосфере, приводят к изменениям постоянной составляющей в сигнале изображения размером  $M \times N$  с коэффициентом  $b$ . Наличие дымки, соответствующей метеорологической дальности видимости 20 км, может приводить к снижению контраста на 15—25 %, а влияние рассеяния — к увеличению контраста на 10—12 % [1]. Искаженное изображение, подвергнутое продольному «смазу», определяется коэффициентом  $e$ , значение которого пропорционально числу «смазанных» пикселей. Проведение процедуры зашумления эталона, а не всей текущей информации, позволяет снизить объем информации, считываемой с ПЗС. При этом использовался центрированный белый шум  $H(i, j)$  с математическим ожиданием  $m = 0$  и дисперсией  $\sigma_{ш}^2$ . Сигнал/шум задается отношением числа неискаженных пикселей  $N$  бинарного изображения к числу искаженных  $N_{инв}$  (инвертированных):  $\psi_k = (N - N_{инв})/N_{инв}$ . Дисперсия шума определяется выражением  $\sigma_{ш}^2 = \sigma_c^2 / \psi_k$ , где  $\sigma_c^2$  — дисперсия сигнала.

Текущие и эталонные изображения подвергаются типовой обработке низкочастотной фильтрации маской  $3 \times 3$  элемента разложения. При этом значение каждого из элементов массива  $F(i, j)$  анализируемого изображения сравнивается со средним значением функции яркости в окне анализа  $\bar{F}$  и заданным порогом  $\Pi_{\phi}$ , в результате этого устраняются одиночные помехи, некоррелированные с соседними элементами [13]:

$$F_{\Phi}(i, j) = \begin{cases} \bar{F} & \text{при } F(i, j) \geq \bar{F} + \Pi_{\Phi} \\ F(i, j) & \text{при } F(i, j) < \bar{F} + \Pi_{\Phi} \end{cases},$$

$$\text{где } \bar{F} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(i, j).$$

Бинарное кодирование проводилось скользящим окном  $m \times n$  элементов разложения с адаптивным порогом. При этом в качестве порога квантования выбирается среднее значение отсчетов яркости по предыдущей строке  $\bar{F}$ , затем формируется бинарный массив, соответствующий входному полутоновому изображению [1]:

$$F_6(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{при } F(i, j) \geq \bar{F} \\ 0 & \text{при } F(i, j) < \bar{F} \end{cases}.$$

Вычисление критериальной функции меры сходства осуществлялось по алгоритму, работа которого основана на определении уровня глобального максимума относительно локальных максимумов [1, 10]:

$$R(m, n) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n -(F(M, N) \oplus G(m-i, n-j)),$$

где  $R(m, n)$  — функция меры сходства;  $F(M, N)$  — массив ТИ форматом  $M \times N$ ;  $G(m, n)$  — массив ЭИ форматом  $m \times n$ .

Имитация реальных условий наблюдения обеспечивается соответствием масштабов изображения в фокальной плоскости стенда и реальной системы. Разрешаемый системой элемент на местности при наблюдении в надир определяется выражением  $l = \Delta m h / f_p$ , где  $\Delta m$  — размер элемента ячейки ПЗС;  $h$  — высота полета носителя;  $f_p$  — фокусное расстояние реальной оптики. Соответствие масштабов обеспечивается выполнением соотношения  $M_{ТИ} = l f / \Delta m H$ , где  $f$  — фокусное расстояние оптической системы стенда;  $H$  — высота телекамеры над ФЦО.

Имитация влияния внешних факторов, проводимая в широких пределах (сигнал/шум  $\psi = 2 \div 50$ ; угол ориентира  $\alpha = 0 \div 12^\circ$ ; соответствие масштабов  $M_{ТИ} = 0,8 \div 1,2$ ; ракурс наблюдения  $\theta = \pm 30^\circ$ ; яркостные искажения  $a = 0,5 \div 1,5$ ; контрастные искажения  $b = (-0,125) \div (+0,25)$ ; смаз  $e = 0 \div 5$ ), позволяет перекрыть весь диапазон изменений сезонных, суточных колебаний освещенности подстилающей поверхности.

Проведение исследований на СЭИ осуществлялось с использованием аэрокосмических фотоснимков масштабом  $1:50\,000 \div 1:200\,000$  в следующем порядке:

1) на ТИ выбирается опорный ориентир, имеющий формат  $32 \times 32$ , и с помощью предметного

столика выводится центр ориентира на режим визирования оптической системы ТВК;

2) в ОЗУ записывается заданный фрагмент ТИ;

3) из ОЗУ считывается фрагмент ТИ, принятый за опорный ориентир, и формируется массив эталонной информации;

4) проводится обработка ЭИ и вычисляются его характеристики  $\sigma_c^2$ ,  $M_c$ ;

5) формируются массивы централизованного белого шума  $\sigma_{\text{ш}}^2$  заданными отношениями сигнала к шуму  $\psi_k$ ;

6) шумовой массив складывается с ЭИ и производится кросс-корреляция ТИ и ЭИ;

7) для различных параметров вычисляются функциональные зависимости вида  $R_m(i, j) = f(\alpha)$ ;  $R_m(i, j) = f(M_{ТИ})$ ;  $R_m(i, j) = f(\theta)$  и т. д. при  $\psi_1, \dots, \psi_i = \text{const}$ .

Полученные зависимости позволяют оценить допустимые значения факторов, при которых обеспечиваются заданные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, а также определить требования к эталонной информации. Исследования проводились при большом числе экспериментов (500) [1], при этом оптимальный объем выборки для обеспечения высоких показателей качества обнаружения и снижения трудоемкости моделирования определяется методикой [14].

В методику отработки АИС на СКО входит:

— проверка функционирования узлов и блоков, заключающаяся в контроле эксплуатационных характеристик при задании диапазонов основных влияющих факторов, имитирующих реальные условия;

— отладка информационного обмена с бортовыми системами КА, заключающаяся в имитации структуры, форматов, последовательности команд реальной бортовой ЭВМ и БКУ КА.

При исследованиях варьировались скорость движения каретки, высота, освещенность, ошибки предварительных целеуказаний и типы подстилающей поверхности. Реальным условиям эксплуатации на стенде соответствуют космические снимки масштаба [10]:  $H_1 = 350$  мм —  $M11 = 1:200\,000$ ;  $H_2 = 700$  мм —  $M12 = 1:100\,000$ ;  $H_3 = 1400$  мм —  $M13 = 1:50\,000$ . Соответствие эксперимента реальным условиям динамики относительного движения носителя и подстилающей поверхности достигается при выполнении условия  $V_k = V_o H f_p / f h$ , где  $V_o$  — вектор скорости движения носителя;  $V_k$  — вектор скорости движения каретки.

Алгоритм испытаний следующий. В натуральных условиях АИС начинает функционировать по информации, поступающей из навигационной системы. Поэтому при выходе в район наблюдения

(РН1—РН4) эмулятор БКУ выдает команду на включение АИС (с учетом возможных ошибок). При этом ошибки предварительных целеуказаний БКУ КА имитируются смещением референтных (опорных) точек стенда на величины  $\Delta X_{\text{БКУ}}$ ,  $\Delta Y_{\text{БКУ}}$ , соответствующие реальным ошибкам штатной аппаратуры управления. После прохода над опорным ориентиром эмулятор БКУ выдает команду на выключение АИС. Кроме этих команд с эмулятора БКУ поступает информация о времени программного выхода на опорный ориентир. Из АИС поступает информация об отклонении текущего значения времени выхода от программного значения  $\Delta t_X = t_t - t_p$ . Ошибка по дальности соответствует значению  $\Delta D_X = \Delta t_X (V_o \pm \delta V_o)$ , где  $V_o$  — программное значение скорости КА,  $\delta V_o$  — отклонение истинной скорости от программной. АИС измеряет временной интервал  $\Delta t_X = T_c n$ , где  $T_c$  — строчный период ПЗС;  $n=1, 2, 3, \dots$ . Ошибка по дальности, вычисляемая по показаниям АИС, определяется из выражения  $\Delta D_X = T_c n V_o (1 \pm \delta V_o / V_o)$ . Ошибка по боку в АИС определяется непосредственно по смещению пика ВКФ в строчном периоде:  $\Delta D_Y = M_s \Delta m H / f$ , где  $M_s = 1, 2, 3, \dots$  — номер элемента в строке;  $\Delta m$  — размер элемента в строке. Информация о текущих значениях координат подвижной платформы поступает с ДЛП X и ДЛП Y в промежуточные буферные регистры Pг X и Pг Y, а с них — в САУ, где сравнивается с программными значениями координат ожидаемого опорного ориентира. Когда разница между этими значениями координат достигает определенной величины (определяется максимальной ошибкой прогноза), САУ выдает команду на включение АИС, которая измеряет истинное значение координат опорного ориентира  $X_i Y_i$ . В памяти САУ хранится программное (виртуальное) значение координаты опорного ориентира  $X_{\text{БКУ}i} Y_{\text{БКУ}i}$ . Разности этих двух значений координат дают ошибки прогноза по дальности  $\Delta D_X = X_i - X_{\text{БКУ}i}$  и по боку  $\Delta D_Y = Y_i - Y_{\text{БКУ}i}$ , являющиеся выходными параметрами. Так как управление АИС осуществляется по координатам, а точность позиционирования стенда более чем на порядок превышает точность измерения координат АИС, то при составлении программы эксперимента необходимо вводить искусственное смещение измеренных и программных координат опорного ориентира. Спецпроцессор макета АИС не обеспечивает опознавания произвольно ориентированных объектов в реальном масштабе времени, поэтому для начальной точки обеспечено совпадение ориентации объектов и эталонной информации, записанной в библиотеке эталонной информации.

На СКО проводились экспериментальные исследования и обработка АИС трех экспериментальных образцов ОЭС комплекса управления

КА дистанционного зондирования Земли: 1) датчика вектора скорости движения изображения [1]; 2) системы траекторной коррекции — датчика опознавания наземных ориентиров [3] и 3) системы конечного наведения — датчика обнаружения и наведения [2]. Их принцип действия основан на корреляционном сравнении цифровой эталонной информации с текущей информацией, снимаемой с видеодатчика. Первый датчик выполнен на базе линейного ПЗС, второй — на основе матричного ПЗС, а в третьем используются две линейки ПЗС.

Основные результаты моделирования на СЭИ представлены на рис. 9—11. Полученные на СКО результаты исследований датчика вектора скорости движения изображения показаны на рис. 12, а, б.

Анализ данных моделирования для изображений, принятых за эталоны, позволил сделать следующие выводы:

1) изменение ориентации ТИ приводит к резкому падению максимума ВКФ, при этом деградация максимума более выражена для высококачественных изображений;

2) максимально допустимым отклонением ориентации ТИ, при котором обеспечивается надежный захват ориентира, можно считать значение  $\alpha = \pm(3 \div 3,5)^\circ$ ;

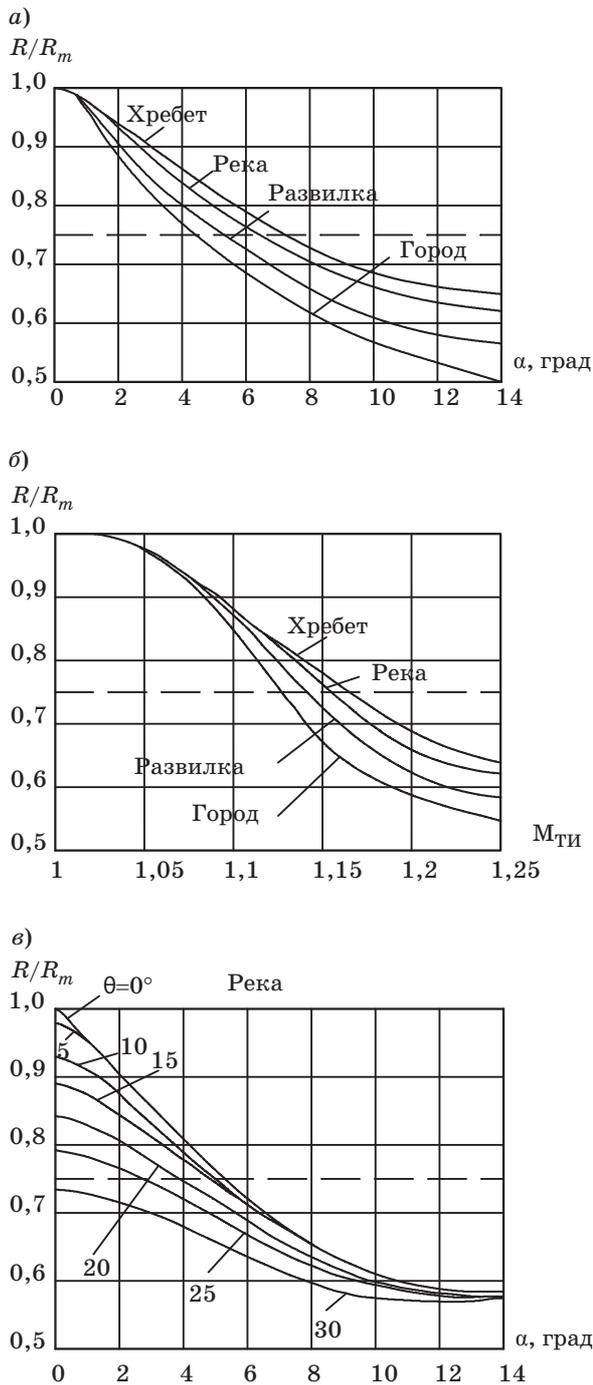
3) изменение контраста на  $\pm 25\%$  практически не влияет на значение максимума ВКФ, что объясняется характером используемого бинарного алгоритма;

4) изменение освещенности текущей сцены на  $\pm 50\%$  относительно ЭИ вызывает деградацию максимума ВКФ на 2% при значениях «смаза»  $e \leq 2$  и на 4% при «смазах» в пределах  $2 \leq e \leq 4$ ;

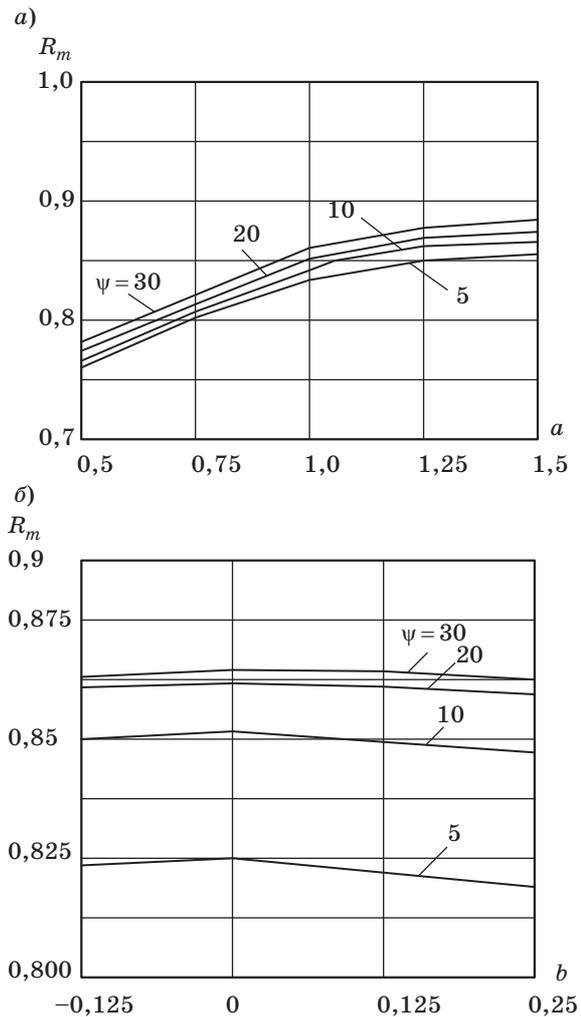
5) «смаз» изображения приводит к уменьшению максимума ВКФ: для  $e \leq 2$  его влиянием можно пренебречь, а для  $e \leq 4$  считать незначительным, при этом для малых значений сигнал/шум  $\psi \leq 8$  влияние «смаза» меньше, чем для  $\psi \leq 15$ ;

6) оптимальным окном интегрирования, обеспечивающим соответствие показателей быстродействия и выходных характеристик, является размер  $5 \times 1$ , а размер ТИ  $512 \times 512$  можно считать достаточным для перекрытия области ошибок предварительных целеуказаний БКУ КА.

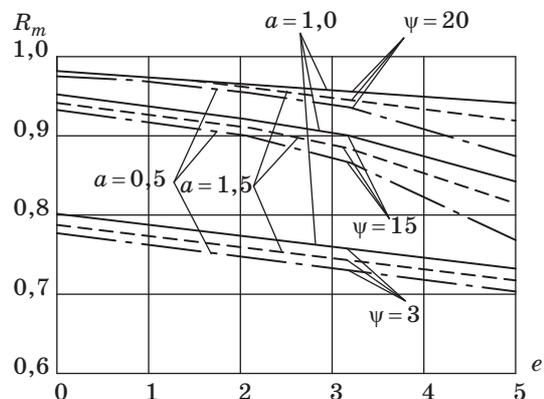
Следовательно, основными факторами, оказывающими существенное влияние на работу корреляционного алгоритма АИС, является отличие ориентации ТИ от ориентации ЭИ и изменение масштаба ТИ. Диапазон изменения параметров, влияющих на величину геометрических искажений ТИ, в основном определяется динамикой движения и точностью показаний систем ориентации и навигации носителя аппаратуры.



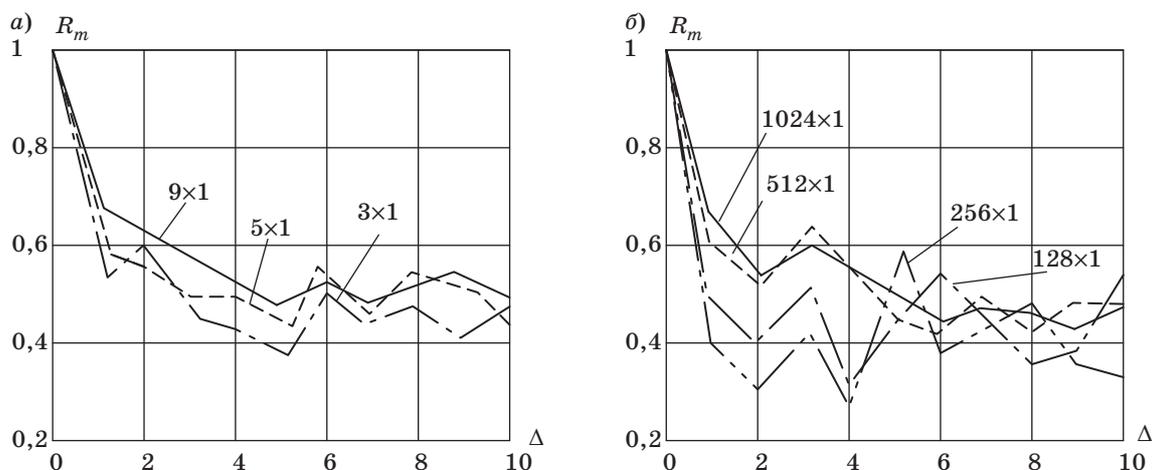
■ **Рис. 9.** Зависимость значений максимума нормированной ВКФ для различных типов наземных ориентиров:  $a$  — от угла ориентации  $\alpha$  при  $\theta=0^\circ$ ,  $M_{TI}=1,05$ ;  $b$  — от изменения  $M_{TI}$  при  $\theta=10^\circ$ ;  $c$  — от изменения угла ориентации  $\alpha$  при различных углах визирования ориентира (пунктирная линия соответствует значениям вероятности правильного обнаружения  $P_D > 0,99$  и ложной тревоги  $P_F < 10^{-5}$  при отношении сигнал/шум  $\psi=5$ )



■ **Рис. 10.** Влияние смоделированных на СЭИ условий наблюдения на деградацию максимума ВКФ для изображения типа «Река» в зависимости от изменения:  $a$  — освещенности  $a$  при  $b=1,25$ ,  $e=1$ ;  $b$  — контраста  $b$  при  $a=0,75$ ,  $e=1$



■ **Рис. 11.** Зависимость ВКФ от изменения смоделированного на СЭИ «смаза»  $e$  для  $b=0,25$  при различных значениях освещенности и соотношений сигнал/шум



■ **Рис. 12.** Зависимость изменения максимума ВКФ от значений координат смещения пикселей линеек ПЗС при отсутствии рыскания: *а* — для выборки 512×1 изображения типа «Река» при различных окнах интегрирования; *б* — для окна интегрирования 5×1 изображения типа «Хребет» при различных длинах выборки

### Заключение

Комплекс технических средств (СКО и СЭИ), созданный для экспериментальной отработки АИС, позволяет проводить:

- исследование влияния внешних факторов на работу АИС;
- формирование требований к базе эталонной информации;
- комплексную обработку всех узлов и блоков АИС;
- отладку информационного взаимодействия АИС с ВКУ;
- исследование влияния параметров движения изображения на разрешающую способность АИС.

Опыт, полученный при создании и эксплуатации стендов, подтверждает целесообразность использования СЭИ для отладки компонентов приемной подсистемы и алгоритмов распознавания еще до создания ОЭС, а СКО — до проведения летных испытаний ОЭС. Сравнение результатов экспериментальных исследований и летных испытаний датчика вектора скорости движения изображения [1] показало, что совместное применение СЭИ и СКО позволяет оценивать точностные характеристики ОЭС для всего диапазона изменений реальных условий эксплуатации, а с учетом стоимости одного запуска КА со спецоборудованием (до 10 млрд руб.) [15] — значительно сократить объем конструкторско-доводочных испытаний и окупить затраты на создание стендов и проведение испытаний.

### Литература

1. Буканов Ф. Ф., Сбродов В. В., Свиридов В. П. Экспериментальные исследования системы определения параметров движения изображения // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. Самара, 1998. Вып. 5. С. 36–41.
2. Сбродов В. В., Леонович Г. И. Телевизионная система опознавания ориентиров и наведения линии визирования // Технологии двойного применения: тр. 1-й Всерос. науч.-техн. конф./Поволжское СПМО и РАН. Самара, 1995. С. 64–67.
3. Сбродов В. В., Свиридов В. П., Сафронов С. Г. Многоконтурные системы управления и навигации на базе датчиков опознавания ориентиров // XVIII Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 30 мая – 1 июня 2011 г./ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор». Санкт-Петербург, 2011. С. 246–247.
4. C. Edward Jones, James Lee. A simulated infrared model board// Guidance, Navigation, and Control and Co-located: Flight Simulation Technologies Conf., St. Louis, 22–24 July, 1985. P. 52–56. <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1985-1748> (дата обращения: 10.11.2013).
5. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век. Т. 11: Оптико-электронные системы и лазерная техника. – М.: Оружие и технологии, 2005. – 720 с.
6. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / под ред. Е. А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.

7. **Космическое** аппаратостроение: Научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / под ред. д.т.н. А. Н. Кирилина. – Самара: АГНИ, 2011. – 280 с.
8. [www.samspace.ru/products/earth\\_remote\\_sensing\\_satellites/ka\\_resurs\\_dk\\_1/](http://www.samspace.ru/products/earth_remote_sensing_satellites/ka_resurs_dk_1/) (дата обращения: 26.10.2013).
9. **Гурский Б. Г., Лющанов М. А., Спирин Э. П.** и др. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск / под ред. В. Л. Солунина/МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2001. – 328 с.
10. **Сбродов В. В., Свиридов В. П., Давыдов В. Г.** Исследование эффективности алгоритмов опознавания ориентиров в комбинированных системах управления подвижных объектов // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. Самара, 2002. Вып. 8. С. 179–186.
11. **Сосулин Ю. Г.** Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
12. **Лазарев Ю. Н., Сбродов В. В., Сафронов С. Г.** Моделирование процедур обнаружения объектов в системах визуального наблюдения//Актуальные проблемы информационной безопасности. Теория и практика использования программно-аппаратных средств: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Самара: СамГТУ, 2012. С. 57–63.
13. **Писаревский А. Н., Чернявский А. Ф., Афанасьев Г. К.** и др. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение)/под общ. ред. А. Н. Писаревского, А. Ф. Чернявского. – Л.: Машиностроение, 1988. – 424 с.
14. **Емельянов В. Ю., Лихолет Н. О., Шаров С. Н.** Возможности сокращения трудоемкости статистического моделирования корреляционно-экстремальных систем // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 13–20.
15. [www.finmarket.ru/news/3367326/](http://www.finmarket.ru/news/3367326/) (дата обращения: 26.10.2013).

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail ([ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

УДК 616-71

# ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ КОНТУРОВ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА ИМПЛАНТИРУЕМЫХ СИСТЕМ

**О. В. Горский<sup>1</sup>,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается один из способов энергообеспечения имплантируемых систем при помощи бесконтактной передачи энергии, накапливаемой в аккумуляторе. На основании реализованного макета системы индуктивной зарядки производится уточнение модели взаимодействия передающего и приемного контуров. Адекватность модели проверяется по результатам стендового эксперимента в средах воздуха и водно-солевого раствора. Приводится классификация данных, задействованных на различных этапах исследования системы.

**Ключевые слова** — бесконтактная передача энергии, имплантируемая система, моделирование электромагнитного поля.

## Введение

Решение задачи энергообеспечения имплантируемых биотелеметрических устройств (имплантов) имеет два основных подхода — использование либо непerezаряжаемых источников питания, либо аккумуляторов, заряжаемых посредством беспроводной передачи энергии (БПЭ). В условиях проведения острых и подострых экспериментов применение первых может быть эффективно, в то время как для проведения хронических опытов потребуется периодическое извлечение импланта для замены энергоносителя [1], в связи с чем использование устройств на базе непerezаряжаемых источников питания становится нецелесообразным как с научной, так и с экономической точек зрения. Система с бесконтактным способом подзарядки лишена этого недостатка.

Основные направления разработки средств БПЭ для имплантов основываются на принципах электромагнитной индукции [2—4], преобразовании энергии микроволнового [5, 6] и ультразвукового [7, 8] излучений. Первый эффективен для передачи энергии на расстояния до нескольких сантиметров ввиду высокой степени рассе-

яния силовых линий поля по мере удаления от источника. Повышение частоты до микроволнового диапазона позволяет увеличить дальность, однако при этом снижается уровень допустимой мощности для биологического объекта (1 мВт/см<sup>2</sup> [9]). Достоинством ультразвукового способа является нечувствительность к окружающим магнитоактивным материалам, а также существенно меньший уровень вызываемых помех. Однако доступные к рассмотрению примеры реализации являются менее энергоэффективными по сравнению с устройствами на базе индукционной БПЭ при схожих массогабаритных и дистанционных характеристиках.

Решаемая нами задача была связана с неоднозначностью расположения импланта в теле и вследствие с этим сложностью точного позиционирования приемно-передающей системы друг относительно друга. При этом передача энергии должна была осуществляться на расстояние в пределах 20—50 мм со средней выходной мощностью 400 мВт. Допустимый объем модуля БПЭ, встраиваемого в имплант, должен был находиться в пределах 1 см<sup>3</sup>. Для решаемой нами задачи наиболее подходящим являлся индукционный способ БПЭ. Использование этого способа требует выполнения ряда технических условий (табл. 1), призванных обеспечить безопасность биологического объекта. Список параметров и их значений составлен на основании норматив-

<sup>1</sup> Научный руководитель — кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела биотехнических проблем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения В. А. Килимник.

■ **Таблица 1.** Перечень требований к беспроводным зарядным устройствам имплантов, основанным на принципе электромагнитной индукции

Параметр	Значение
Объем импланта [10]	До 5 % от массы объекта
Допустимый нагрев тканей, окружающих имплант [11]	До +2 °C
Допустимые уровни электромагнитного поля, кГц [9]	Диапазон 30÷3000
Максимальные значения: E, В/м H, А/м	
Энергетические экспозиции (ЭЭ): ЭЭ <sub>E</sub> , (В/м) <sup>2</sup> ·ч ЭЭ <sub>H</sub> , (А/м) <sup>2</sup> ·ч	500 50 20 000 200
Разрешенные частоты работы генератора в диапазонах длинных и средних волн, кГц [12]	44 ± 10 %
	66 + 12, -10 %
	440 ± 2,5 %
	880 ± 1 %
	1760 ± 2,5 %
	2640 ± 1 %

ных документов, действующих на территории РФ, а также результатов специализированных исследований.

В статье приведены результаты серии стендовых и модельных экспериментов с элементами системы бесконтактной зарядки. Нами исследовалось распределение величины зарядного тока

в зависимости от перемещения приемного контура (ПрК) в объеме переменного электромагнитного поля передающего контура (ПдК). Эксперименты проводились как в воздушной среде, так и в имитационной среде биологического объекта — изотоническом растворе. По результатам стендовых экспериментов производилась разработка параметрической модели, состоящей из решения магнитостатической задачи по выявлению характеристик трансформаторной связи при различных зазорах и осевых положениях контуров и задачи анализа переходных процессов в электрической цепи приемного модуля для определения достижимого уровня зарядного тока аккумулятора.

Целью исследования являлся синтез последовательности аналитических и модельных расчетов параметров ПрК, призванной в дальнейшем оптимизировать процесс разработки приемных модулей БПЭ имплантов. Отметим, что на данном этапе учитывались требования лишь по массогабаритным характеристикам ПрК и по работе системы в разрешенном частотном диапазоне. Проведенная работа является продолжением исследований, рассмотренных в статье [13].

### Методика исследований

Для облегчения восприятия концепции разрабатываемой модели была сформирована классификация всех имевшихся и планируемых к получению данных (рис. 1). Общая идея заклю-



■ **Рис. 1.** Классификация данных, задействованных в исследовании

чалась в минимизации использования экспериментальных данных для построения приемной цепи и учета всех доступных данных для описания передающей цепи. Таким образом предполагалось получить возможность проектировать любые конфигурации приемных катушек при наиболее достоверно описанной передающей части. Отдельно отметим класс вспомогательных измеренных параметров, использование которых позволяло на этапе моделирования электрической цепи частично нивелировать отсутствие неучтенных параметров системы. Критерием адекватности модели являлась степень совпадения картины распределения зарядного тока с результатом стендового эксперимента.

Стендовый эксперимент проводился с индуктивными контурами, конструктивно реализованными на печатной плате [14] (РСВ-контур). Их характеристики приведены в табл. 2. ПдК подключен к генератору, использующему полумостовую схему включения с управлением мощности посредством широтно-импульсного модулятора. Генерируемый сигнал амплитудой 23,6 В имел частоту 879,5 кГц. Частоты диапазона 871 ÷ 889 кГц разрешены для использования в промышленных, научных, медицинских и бытовых высокочастотных устройствах на территории РФ. Использование других частотных диапазонов возможно при условии экранирования рабочего объема, что потенциально усложняет эксплуатационные характеристики системы.

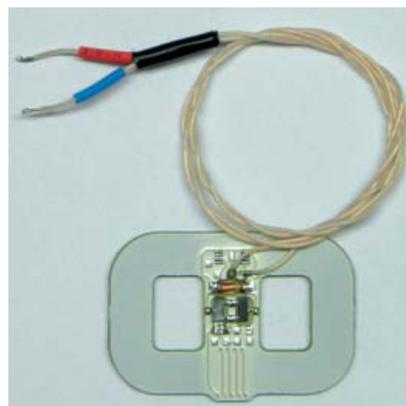
Амплитудное значение тока в режиме холостого хода (без ПрК) было выставлено на уровне 930 мА, что практически позволяло нам достичь требуемого диапазона зарядных токов.

Для определения индуктивности и активной составляющей сопротивления катушек применялся RLC-метр АКИП-6104, имеющий погрешность на использованных диапазонах измерения 0,2 %.

Приемный модуль представлял собой печатную плату с проводящим рисунком индуктивности и посадочными местами для конденсатора колебательного контура, защитного стабилитрона, диодного выпрямителя и фильтрующего конденсатора. Для герметизации модуля применялась полимерная инкапсуляция [15]. Внешний вид заготовки до корпусирования представлен на рис. 2. Выпрямленное напряжение затем подавалось на внешний модуль со схемой управления зарядом, где и производился контроль зарядного тока. В опытах использовался Li-ion аккумулятор емкостью 2000 мА·ч, напряжение на котором поддерживалось на одинаковом уровне 3,8 В между сериями замеров, а влияние изменения напряжения во время серии пренебрегалось ввиду существенной разницы между емкостью батареи и передаваемого ей заряда.

■ Таблица 2. Характеристики используемых в эксперименте контуров

Контур	Д × Ш, мм	N, витки	L, мкГн	R, Ом	Q (при 880 кГц)
Передающий	100 × 100	36	83,3	2,1	217
Приемный	30 × 20	45	60,7	8,1	41,4



■ Рис. 2. Внешний вид приемного модуля

Экспериментальная установка для проведения измерений в различных средах представлена на рис. 3, а—в. Для получения зависимости величины зарядного тока от координаты положения приемной катушки применялся двухосевой манипулятор с ходом 60 мм по каждой из осей и шагом 0,1 мм, к которому крепился герметизированный модуль. Передающая катушка была установлена на основании из пластмассы, при этом в радиусе 150 мм отсутствовали металлические и прочие магнитоактивные материалы. Для имитации биологического объекта использовалась пластмассовая емкость с изотоническим раствором (0,9 % NaCl в дистиллированной воде) размером 170 × 115 × 45 мм. Расстояние от ПдК до жидкости составляло 14 мм.

Приемный контур перемещался от центра ПдК вдоль оси, проходящей через его большую сторону, обозначенную как ось X. Ось Z располагалась перпендикулярно плоскости катушек. Снималось распределение зарядных токов в плоскости X-Z. Начало координат находилось в середине ПдК. Исходя из предположения, что картина распределения симметрична относительно центральной поперечной оси ПдК, фиксировались значения только вдоль положительных значений осей X и Z. По оси X — до 45 мм с шагом 5 мм, по оси Z — до 60 мм с шагом 5 мм. Для эксперимента взаимодействия контуров измерения производились по оси Z в воздушной среде, на-

чащая с 10 мм, в изотоническом растворе — начиная с 20 мм.

Изменение положения ПрК приводило к изменению величины эквивалентного вносимого сопротивления в цепь генератора, что влияло на величину тока в ПдК. Это сопровождалось нагревом (в пределах 10 °С) диэлектрика конденсаторов и проводников печатной платы передающего индуктора, что в свою очередь сказывалось на частотных характеристиках резонансной цепи. Для минимизации этого эффекта замеры производились короткими по времени сериями, чередуясь с паузами для охлаждения. Возврат к исходному состоянию контролировался по амплитуде тока в ПрК в режиме холостого хода.

Затем была выполнена оценка амплитудно-частотной характеристики значений тока в ПдК и ПрК в целях выявления их добротности и реальной резонансной частоты. Степень расстройки контура и влияние прочих паразитных характеристик должны были быть учтены при построении модели. Характеристики были получены при помощи осциллографа Tektronix DPO3054. К лабораторному генератору сигналов ГЗ-112 последовательно с токоизмерительным резистором 0,5 Ом подключался исследуемый контур. Фиксировались напряжения на клеммах генератора и на резисторе, а также фазовый сдвиг между

сигналами и их частота. Предварительно, опытным путем, было уточнено значение эквивалентного внутреннего сопротивления  $R_s$  генератора сигналов, которое составило 53 Ом. Добротность оценивалась по формуле  $Q = \omega_0 / \Delta\omega$ , где  $\omega_0$  — частота пика амплитуды тока;  $\Delta\omega$  — диапазон частот, содержащий амплитуды выше  $I_0 / \sqrt{2}$ .

Для построения теоретической амплитудно-частотной характеристики использовалась зависимость, связывающая ЭДС генератора  $E_0$  с амплитудным значением тока в цепи  $I_0$ :

$$I_0(\omega) = \frac{E_0}{\sqrt{Z_{re}^2 + Z_{im}^2}}, \quad (1)$$

где  $Z_{re}$  и  $Z_{im}$  — соответственно вещественная и мнимая части сопротивления цепи.

Вещественная часть определялась сопротивлениями генератора  $R_s$ , измерительного резистора  $R_{cs}$  и активного сопротивления катушки  $R_{Ldc}$ , связанными выражением

$$Z_{re} = R_s + R_{cs} + R_{Ldc}. \quad (2)$$

Соответственно мнимая часть была определена выражением

$$Z_{im} = \omega L - 1 / \omega C, \quad (3)$$

где  $L$  — индуктивность катушки;  $C$  — емкость конденсатора;  $\omega$  — рабочая частота.

Теоретическое значение  $R_{Ldc}$  определялось по базовой формуле для вычисления сопротивления

$$R = \frac{\rho l}{hp}, \quad (4)$$

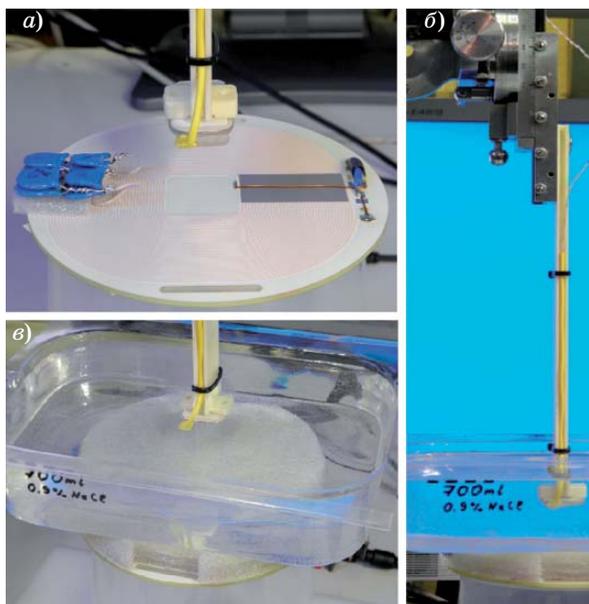
где  $\rho = 1/\sigma$  — удельное сопротивление;  $l$  — длина проводника;  $h$  — высота проводника.

Для вычисления длины  $l$  квазилинейного проводника была использована аналитическая формула, описывающая конфигурацию тестируемой спиральной катушки:

$$l = \sum_{i=0}^{N-1} 2\pi(r - ie) + 2N(a - 2r) + (2N - 1)(b - 2r) - Ne, \quad (5)$$

где  $N$  — число витков;  $a, b, r$  — соответственно длина, ширина и радиус закругления катушки, определяемые по средним линиям внешнего витка.

Практическая неприменимость формулы Томпсона для расчета номинала конденсатора резонансной цепи обуславливалась наличием паразитной емкости катушки. Общепринятой схемой замещения индуктивности с паразитными характеристиками является емкость, подключенная параллельно последовательно соединенным индуктивности и ее активного сопротивления. В работе [4] предлагается оценивать порядок распределенной по виткам РСВ-катушек емкости  $C_p$



■ **Рис. 3.** Внешний вид экспериментальной установки: *a* — передающий и приемный контур, работа в воздушной среде; *б* — крепление герметизированного приемного модуля к микроманипулятору; *в* — установка емкости с изотоническим раствором на контур

с учетом различной диэлектрической проницаемости сред (воздух и стеклотекстолит FR-4):

$$C_p = C_{pc} + C_{ps} \approx (\alpha \varepsilon_{rc} + \beta \varepsilon_{rs}) \varepsilon_0 \frac{h}{g}, \quad (6)$$

где  $\alpha=0,9$ ,  $\beta=0,1$  — эмпирические коэффициенты объемного отношения диэлектриков;  $\varepsilon_{rc}=1$  и  $\varepsilon_{rs}=4,1$  — соответственно диэлектрическая проницаемость воздуха и текстолита [16];  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $g$  — зазор между проводниками;  $h$  — общая длина зазора, которая может быть вычислена схожим образом по формуле (5).

При введении в схему  $C_p$  формулы (2) и (3) преобразуются соответственно в формулы

$$Z_{re} = R_s + R_{cs} + \frac{R_{Ldc}}{1 - \omega^2 C_p (2L + \omega^2 L^2 C_p + R_{Ldc}^2 C_p)}; \quad (7)$$

$$Z_{im} = \frac{\omega L - \omega^3 L^2 C_p - \omega R_{Ldc}^2 C_p}{1 - \omega^2 C_p (2L + \omega^2 L^2 C_p + R_{Ldc}^2 C_p)} - 1 / \omega C. \quad (8)$$

Расчет собственных и взаимной индуктивностей производился при решении магнитоэлектростатической задачи (Magnetostatic) в программе Ansoft Maxwell. Контуры в воздушной среде могут быть рассмотрены, как трансформатор с воздушным зазором. Для создания простейшей модели такого трансформатора нам необходимо было вычислить его взаимную индуктивность в общем виде, определяемую по формуле

$$L_{12} = k \sqrt{L_{11} L_{22}}, \quad (9)$$

где  $k$  — коэффициент связи;  $L_{11}$ ,  $L_{22}$  — индуктивности соответственно передающего и приемного контуров.

Размеры и положение геометрических моделей контуров (рис. 4) задавались параметрически, исходя из размеров изготовленных катушек. Это позволяло автоматизировать процесс перебора и оптимизации значений целевых показателей. На этом этапе важна была точность задания объема, занимаемого катушкой, так как от этого напрямую зависит результат расчета индуктивности. Приложение использует метод конечных элементов для решения трехмерных электромагнитных полей. Исследуемый объем разбивается на множество тетраэдров, для которых производится расчет уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{H}$  — вектор напряженности магнитного поля;  $\mathbf{J}$  — вектор плотности тока;  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции.

Связь  $\mathbf{H}$  с  $\mathbf{B}$  вводится через величину относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , по формуле

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (11)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

Потокоцепление каждого контура связано с протекающим через него током матрицей, где диагональные элементы являются собственными значениями индуктивности, а остальные взаимными:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Здесь  $\lambda_j$  и  $i_j$  — соответственно потокоцепление и ток  $j$ -й катушки.

Матрица индуктивностей была рассчитана исходя из выражения для энергии магнитного поля:

$$U = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \int \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} d\Omega. \quad (13)$$

Наконец, индуктивности катушек с учетом количества их витков  $n$  рассчитываются по формуле  $L_{Cioij} = L_j n^2$ .

Был произведен расчет омических потерь в объеме передающей катушки для оценки ее активного сопротивления. Использовался закон Ома в дифференциальной форме для изотропных материалов:

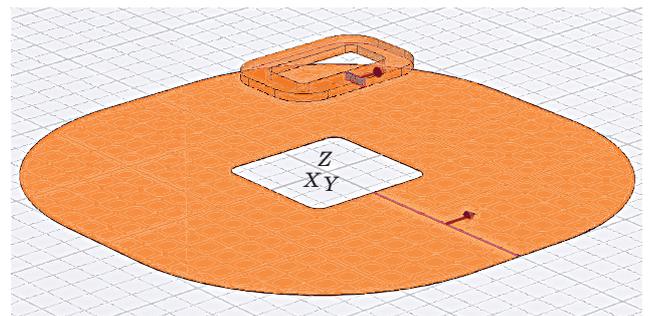
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (14)$$

где  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля;  $\sigma = 57,143 \cdot 10^6$  — удельная проводимость меди.

По формуле (14) вычислялась мощность, теряемая на активном сопротивлении материала:

$$P = \int_V \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma} dV. \quad (15)$$

В расчетах учитывался коэффициент заполнения витками объема реального контура



■ Рис. 4. Трехмерная модель индуктивных контуров

$k_{wind}=e/p$ , где  $e$  — шаг витков;  $p$  — ширина проводника. Результирующее значение сопротивления вычислялось по формуле

$$R_{Ldc} = k_{wind} \frac{P}{I}. \quad (16)$$

Для получения значений зарядного тока использовалось приложение Ansoft Simplorer. В качестве примера на рис. 5 показана одна из конфигураций исследуемой схемы. Генератор сигнала воспроизводит форму подаваемых на реальный контур импульсов напряжения с учетом их временных и амплитудных характеристик. Блок модели исследуемого трансформатора содержит значения индуктивностей, активных сопротивлений, таблицу значений коэффициентов связи.

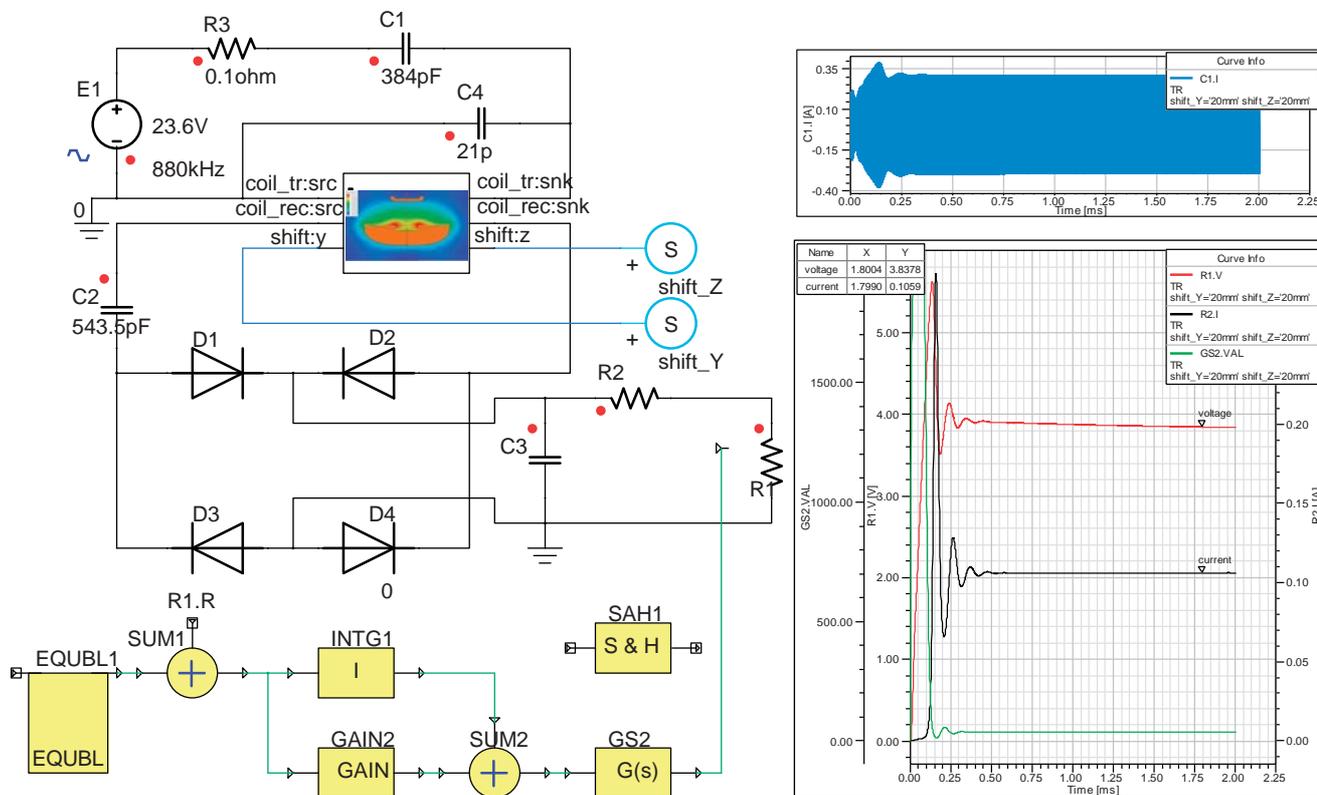
Учитывался фактор расстройки контуров из стендового эксперимента, эквивалентно рассчитанный для номиналов индуктивности, полученных из магнитоэлектронической задачи. В схему была введена эквивалентная паразитная емкость ПДК. Для имитации работы микросхемы управления зарядом и аккумулятора была построена цепь ПИ-регулятора для стабилизации напряжения на резисторе  $R_1$  путем корректировки номинала эквивалентного сопротивления. Координа-

та положения ПРК задавалась параметрически, что позволяло производить расчет распределения величины зарядного тока в автоматическом режиме.

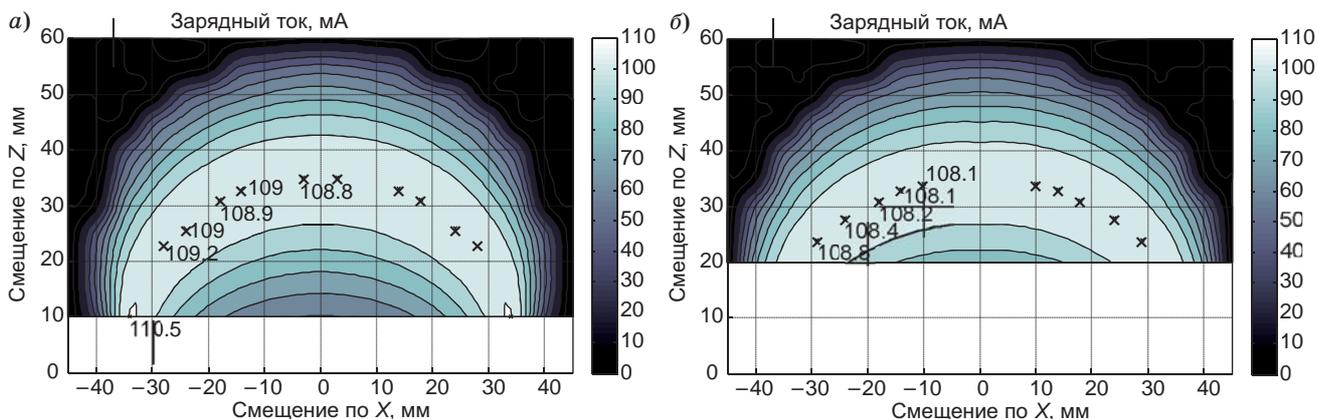
### Результаты измерений и вычислений

Результаты стендового эксперимента представлены на рис. 6, а, б. Цветовая шкала отражает величину зарядного тока. Метками  $\times$  отмечены точки локальных максимумов, образующих криволинейную ось зоны наибольших значений тока.

Сравнение работы системы в различных средах позволяет отметить небольшое (в пределах 2 мм) боковое смещение зон эквивалентных величин тока в жидкости, а также их ослабление по оси  $Z$  в центре. Это, возможно, связано с разницей величин магнитной проницаемости между средами и, следовательно, пропорциональным ей изменением тангенса угла падения и преломления индукционных линий [17]. Свой вклад в снижение выходной мощности вносила разница в удельном сопротивлении веществ, которое у изотонического раствора составляет порядка 500 Ом·м, что приводит к дополнительным потерям мощности из-за возникновения вихревых токов в жидкости.

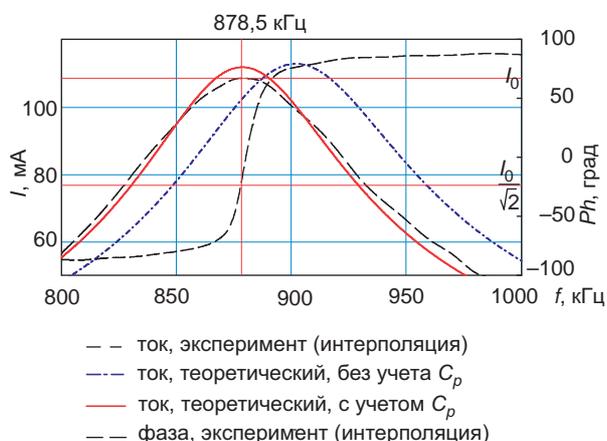


■ Рис. 5. Модель принципиальной схемы системы



■ **Рис. 6.** Распределение значений зарядного тока в воздушной среде (а) и в изотоническом растворе (б) при стендовом эксперименте

Амплитудно-частотные характеристики значений тока в передающем контуре представлены на рис. 7. Резонансная частота ПдК составила 878,5 кГц. Экспериментальное значение добротности составило 8,3. Столь низкое значение было обусловлено наличием в последовательной цепи контура внутреннего сопротивления генератора, что, однако, не мешало нам исследовать его характеристики. Так как настройка контура на резонансную частоту осуществлялась конденсатором, экспериментальным путем был подобран необходимый номинал для работы на выбранной частоте. Он составил 376 пФ против 397 пФ, рассчитанных по формуле Томпсона  $C = 1/(\omega_0^2 L)$ . Столь существенное различие обусловлено, в основном, наличием паразитной емкости катушки. На рис. 7 также изображена теоретическая зависимость при подобранном номинале конден-



■ **Рис. 7.** Экспериментальные и теоретические зависимости значений тока и фазового сдвига от частоты генератора

сатора, при этом ток достигал бы максимума на частоте 904 кГц.

Полученное по формуле (6) значение паразитной емкости составило 27 пФ. Параллельное подключение емкости  $C_p$ , описанное выражениями (7) и (8), приводило к смещению резонансной частоты на графике аналитической функции в сторону уменьшения по мере увеличения номинала. Расчет значений тока с определенным номиналом  $C_p$  показал смещение резонансной частоты до 868,5 кГц. Таким образом, формула с приведенными коэффициентами может быть использована лишь для грубой оценки. Оптимизированное для частоты 878,5 кГц значение при подобной схеме замещения составило 19,5 пФ.

Рассчитанное по формуле сопротивление передающего контура  $R_{L1} = 1,86$  Ом при длине проводника 7,82 м. Влияние скин-эффекта при расчетах не учитывалось, так как глубина проведения тока для рабочей частоты составляла 71 мкм, что больше половины толщины используемого медного слоя.

Эксперимент по выявлению собственной резонансной частоты ПдК посредством анализа фигуры Лиссажу по напряжениям генератора и контура показал результат 6,12 МГц и соответствующее ей значение паразитной емкости 8,2 пФ. Существенное отличие от рассчитанной величины определяется распределенным характером паразитной емкости, который не может быть соотнесен с эквивалентным представлением, использованным при выводе формулы (6).

Касательно ПрК отметим, что задействованный в экспериментах экземпляр имел резонансную частоту 866 кГц, что показало аналогичное исследование частотных характеристик. Экспериментальное значение добротности 5,7 при работе в последовательной цепи генератора ГЗ-112.

Подобный уровень расстройки контура оправдан ввиду низкой добротности всей приемной цепи в режиме нормального функционирования из-за постоянно подключенной нагрузки в виде аккумуляторной батареи. Вследствие этого смещение резонансной частоты не так критично по сравнению с ПрК, где внутреннее сопротивление генератора сравнительно мало (по отношению к тому же ГЗ-112). Фактор ограниченности номинального ряда чип-конденсаторов типоразмера 0402 и ограничение монтажного пространства на плате также затрудняли производство точной настройки. Для построения модели все описанные выше расчеты были проведены и для приемной катушки.

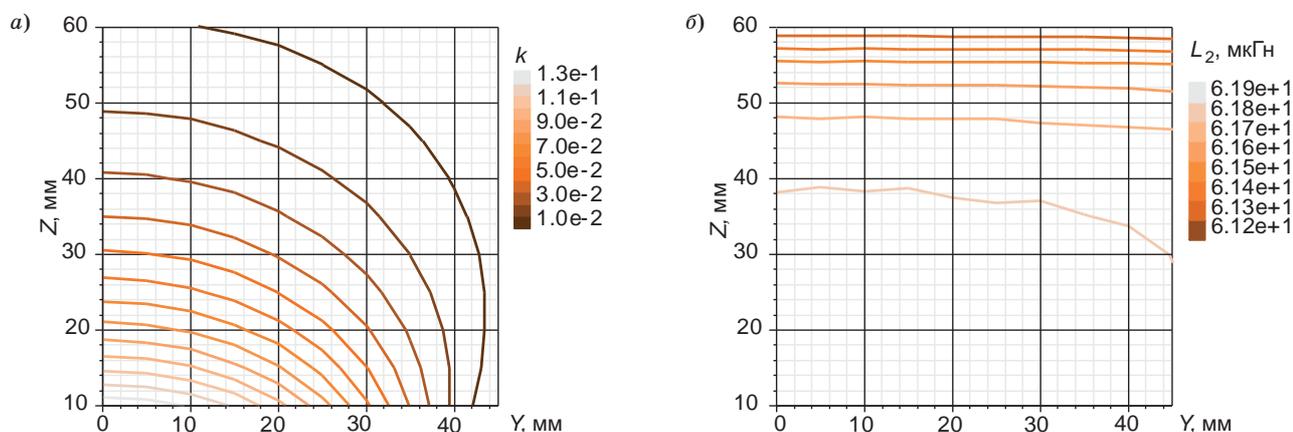
Расчеты значений индуктивности и коэффициентов связи катушек производились для тех же значений координат, что и во время стендового эксперимента. Распределение значений коэффициента связи изображено на рис. 8, а. Усредненное значение  $L_{11}=80,71$  мкГн ( $\sigma=0,03$ ),  $L_{22}=61,72$  мкГн ( $\sigma=0,19$ ). Однако если индуктивность ПдК фактически не зависит от положения ПрК, то индуктивность последнего в модели изменяется существенно (рис. 8, б). Это связано с магнитостатическим типом решаемой задачи и представлением контуров в виде неразделенного на витки проводника. В действительности же их сближение приводит к малому (в пределах 0,1 мкГн) снижению индуктивности. Реальный контур настраивался на частоту с учетом индуктивности, измеренной удаленно от прочих проводников, поэтому контур в модели электрической цепи настроен при фиксированном значении индуктивности  $L_{22}=61,2$  мкГн (при наибольшем удалении 60 мм).

Выделяемая на активном сопротивлении мощность при протекании тока амплитудой

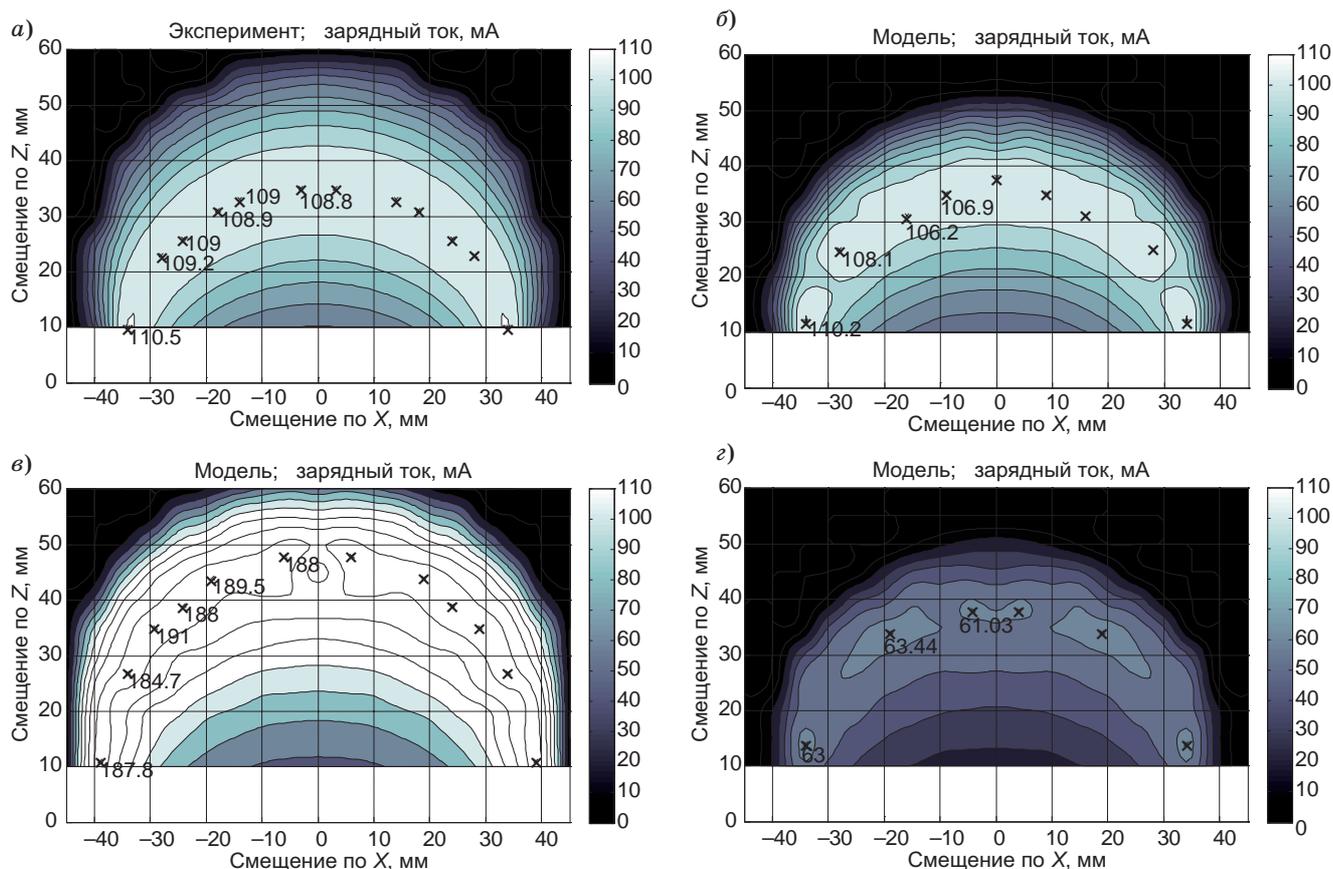
1 А составила 1,256 Вт. Для нашего контура  $k_{wind}=1,5$ , соответственно получена величина активного сопротивления  $R_{L1}=1,88$  Ом. Полученное значение практически совпало с рассчитанным по формуле (4). Разница между теоретическим и экспериментальным значением составила 0,23 Ом (11 %), что могло быть связано с несоответствием фактических параметров изготовленных плат заявленным.

Учитывая схожие результаты стендового эксперимента в средах воздуха и изотонического раствора, для расчета величин зарядного тока была проанализирована модель только с воздушным зазором. Полученные результаты представлены на рис. 9, а–г. Параметр  $U_e$  — амплитуда импульса напряжения генератора,  $R_{dc}$  — суммарное активное сопротивление цепи ПдК. Наиболее достоверная картина распределения токов была получена при введении в схему ПдК дополнительного активного сопротивления, величина которого обеспечивала ток холостого хода в контуре, соответствующий реальной системе (см. рис. 9, б). Дополнительная составляющая сопротивления делится между неучтенными сопротивлениями генератора и ПрК.

При использовании номинала  $R_{dc}$ , рассчитанного из всех описанных ранее сопротивлений, было получено распределение, показанное на рис. 9, в. Отметим повышение среднего уровня зарядного тока наряду с удалением от центра ПдК кривой максимальной мощности. С одной стороны, уменьшение активного сопротивления цепи естественным образом приводит к увеличению тока в цепи и, следовательно, индукции поля ПдК и ЭДС в ПрК. Смещение же кривой максимальной мощности определяется изменением согласованного сопротивления, зависящего от коэффициента связи (следует из теории



■ Рис. 8. Величины распределения коэффициента связи контуров (а) и индуктивности ПрК (б) в зависимости от взаимного расположения катушек



■ **Рис. 9.** Трехмерные графики распределения тока по результатам стендового эксперимента в воздухе (а) и моделирования с параметрами  $U_e = 23,6$  и  $R_{dc} = 4,6$  (б),  $U_e = 23,6$  и  $R_{dc} = 2,2$  (в),  $U_e = 12$  и  $R_{dc} = 2,2$  (г)

отраженного импеданса трансформатора). Обратим внимание на совпадение контуров распределений коэффициента связи и зарядного тока. Однако моделирование системы с тем же значением  $R_{dc} = 2,2$  Ом (см. рис. 9, г), но с вдвое меньшей амплитудой импульсов генератора показало не только снижение амплитуды зарядного тока, но и уменьшение оптимального расстояния до центра ПдК. Этот факт объясняется тем, что величина отраженного импеданса также зависит от ЭДС в ПрК в связи с присутствием в цепи стабилизатора напряжения (модуля управления зарядным током аккумулятора).

### Заключение

Стендовые эксперименты в средах воздуха и изотонического раствора показали идентичные результаты, что дало возможность исключить из расчетов влияние перемены описываемых сред. Форма области максимальной мощности допускала ошибку при взаимном позиционировании контуров приблизительно на  $\pm 30$  мм по горизонтали и на  $\pm 10$  мм по вертикали при среднем

уровне зарядного тока 100 мА, что удовлетворяло исходным требованиям. Также отметим достижимость результата при заявленных габаритных характеристиках ПрК и работе системы на разрешенной частоте. Полученные результаты расчетов продемонстрировали эффективность выбранного пути разработки модели наряду с выявлением моментов, позволивших бы в дальнейшем уточнить результаты проектирования. Среди них отметим неполный учет внутреннего сопротивления генератора, отсутствие просчета скин-эффекта для проводников прямоугольного сечения (при толщине скин-слоя больше половины толщины проводника), упрощенное представление паразитной емкости катушек, а также игнорирование факта изменения индуктивности приемной катушки по мере ее приближения к передающей катушке. Приведенные недостатки компенсировались косвенно вычисленными параметрами по данным вспомогательных экспериментов для передающего контура, что не нарушало цели исследования и позволило достигнуть высокой степени совпадения результатов стендовых и модельных экспериментов.

Литература

1. **Grenwis Jessica E.** Recent advances in telemetry promote further progress in reduction and refinement // NC3Rs Recent advances in telemetry / National Centre for the Replacement Refinement and Reduction of Animals in Research. Mar. 2010. Vol. 20. – 8 p. <http://www.nc3rs.org.uk/downloaddoc.asp?id=1146&page=1240&skin=0> (дата обращения: 12.11.2013).
2. **Basset P., Andreas Kaiser B. L., Collard D., Buchailot L.** Complete system for wireless powering and remote control of electrostatic actuators by inductive coupling // ASME Transactions on Mechatronics/IEEE. Feb. 2007. Vol. 12. N 1. P. 23–31.
3. **Artan N. S.** et al. A High-Performance Transcutaneous Battery Charger for Medical Implants // 32nd Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010), Buenos Aires, Argentina, Aug.–Sept. 2010. P. 1581–1584.
4. **Jow U., Ghovanloo M.** Design and Optimization of Printed Spiral Coils for Efficient Transcutaneous Inductive Power Transmission // IEEE Transactions on biomedical circuits and systems. Sept. 2007. Vol. 1. N 3. P. 193–202.
5. **Huang F. J., Lee C. M.** et al. Rectenna application of miniaturized implantable antenna design for triple-band biotelemetry communication // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. July 2011. Vol. 59. N 7. P. 2646–2653.
6. **Monti G., Tarricone L., Trane C.** Experimental characterization of a 434 MHz wireless energy link for medical applications // Progress in Electromagnetics Research C. June 2012. Vol. 30. P. 53–64.
7. **Ozeri S., Shmilovitz D., Singer S., Wang C.** Ultrasonic transcutaneous energy transfer using a continuous wave 650 kHz Gaussian shaded transmitter// Ultrasonics. June 2010. Vol. 50. N 7. P. 666–674.
8. **Mazzilli F.** et al. In-Vitro Platform to study Ultrasound as Source for Wireless Energy Transfer and Communication for Implanted Medical Devices//32nd Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010), Buenos Aires, Argentina, Aug.–Sept. 2010. P. 3751–3754.
9. **СанПиН 2.2.4.1191-03.** Электромагнитные поля в производственных условиях/Информационно-издательский центр Минздрава России. – М., 2004. – 13 с.
10. **Руководство по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических средств / под общ. ред. чл.-корр. РАМН, проф. Р. У. Хабриева.** 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2005. – 832 с.
11. **Seese T. M., Harasaki H., Saidel G. M., Davies C. R.** Characterization of tissue morphology, angiogenesis, and temperature in the adaptive response of muscle tissue to chronic heating // Laboratory investigation. 1998. Vol. 78. N 12. P. 1553–1562.
12. **Таблица распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации:** утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 21.12.2011 г. № 1049-34. – 175 с. [http://minsvyaz.ru/common/upload/1049-34\\_pril.pdf](http://minsvyaz.ru/common/upload/1049-34_pril.pdf) (дата обращения: 12.11.2013).
13. **Варавва А. Н., Килимник В. А.** Бесконтактное зарядное устройство с автоматической стабилизацией зарядного тока // Шестьдесят третья студ. науч.-техн. конф. ГУАП: сб. докл.: в 2 ч. Ч. 1. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2010. С. 422–428.
14. **Горский О. В.** Система бесконтактной зарядки источников питания имплантируемых и портативных устройств // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: в 3 ч. Ч. 2. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2012. С. 176–179.
15. **Килимник В. А., Сачков А. В.** Методы и средства защиты имплантируемых биотехнических модулей от факторов внутренней среды биологических объектов // Научная сессия ГУАП: сб. докл. в 3 ч. Ч. 2. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2011. С. 119–123.
16. **Ritchey L. W.** A survey and tutorial of dielectric materials used in the manufacture of printed circuit boards//CircuiTree Magazine. Nov. 1999. – 10 p. <http://www.speedingedge.com/docs/tutorial.doc> (дата обращения: 12.11.2013).
17. **Круг К. А.** Основы электротехники. Учение об электричестве. Т. 1. – М.: ОГИЗ, 1931. – 559 с.

УДК 004.05

## СПОСОБЫ РЕЛЯЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДАННЫХ

**С. В. Тарасов,**ведущий инженер исследований и разработки  
Bel Air Informatique, Париж, Франция**В. В. Бураков,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Данные различных предметных областей часто имеют связи иерархического характера. Наиболее надежным способом хранения информации до сих пор являются реляционные базы данных. Реляционный способ моделирования в чистом виде не поддерживает иерархические типы данных. Распространенность иерархических структур в задачах автоматизации обосновывает актуальность поиска способов эффективного отображения древовидных данных в реляционную модель. В статье рассматриваются способы представления структур иерархического типа в реляционных базах данных и типовые запросы к этим структурам хранения. Описаны критерии количественной оценки способов хранения и их сравнительные характеристики.

**Ключевые слова** — иерархические структуры данных, реляционные базы данных.

### Введение

В области баз данных обычно различают три вида проектирования: концептуальное, логическое и физическое [1, 2]. Логическое проектирование позволяет выделить и обобщить типовые способы, независимые как от предметных областей (концептуальное проектирование), так и от деталей реализации и операционных сред (физическое проектирование).

Проектировщику часто приходится сталкиваться с древовидными структурами, представляющими собой граф без циклов. В общем случае моделирование сводится к многоуровневой связи «главный — подчиненный», «предок — потомок», «общий — конкретный». Реляционный способ моделирования не обладает какими-либо специализированными механизмами для адекватного представления иерархической информации. Распространенность иерархических структур в реальном мире обосновывает актуальность поиска способов эффективного отображения древовидных данных в реляционную модель.

При рассмотрении общих способов представления древовидных структур в реляционных базах данных в качестве примера использована СУБД Microsoft SQL Server (для типовых операций используется синтаксис MS SQL Server

2005). Вместе с тем все предложенные способы являются независимыми от реализации, поскольку описываются на уровне логического проектирования и могут быть воспроизведены на других СУБД, поддерживающих реляционную модель.

### Используемые понятия теории графов

Графы широко используются для моделирования различных концепций теории программирования [3, 4]. Основные понятия описаны в специальной литературе [5—8], здесь перечислены только определения, используемые далее в тексте статьи. Дерево — это связный ациклический граф [5]. Связность означает наличие путей (простой цепи) между любой парой вершин, ациклическость — отсутствие циклов, т. е. между любыми парами вершин имеется только по одному пути. Граф порядка  $N$  называется помеченным, если его вершинам присвоены некоторые метки, например, номера  $1, 2, \dots, N$ . Пара вершин  $u$  и  $v$  графа является смежной, если множество  $\{u, v\}$  является ребром. Произвольный помеченный граф порядка  $N$  можно представить в виде квадратной бинарной матрицы  $N \times N$ , где на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца стоит 1, вершины  $i$  и  $j$  смежны, или 0 в противном случае. Такое

представление называется матрицей смежности [5]. Граф является ориентированным (орграф), если все его ребра ориентированы, т. е. смежные вершины разделены на начальную и конечную. Ориентированное ребро называется дугой. В ориентированном дереве имеется только одна вершина с нулевой степенью захода (в нее не ведут дуги), она называется корнем дерева, а все остальные вершины имеют степень захода 1 (в них ведет ровно по одной дуге). Вершины с нулевой степенью исхода (из которых не исходит ни одна дуга) называются концевыми вершинами или листьями. Если в дереве существует путь из вершины  $a$  к вершине  $b$ , то вершина  $a$  называется предком вершины  $b$ , а вершина  $b$  — потомком вершины  $a$ . Путем из вершины  $n_i$  к вершине  $n_j$  называется последовательность вершин, где для всех  $k, i \leq k \leq j$ , узел  $n_k$  является предком узла  $n_{k+1}$ . Длиной пути называется число, на единицу меньшее числа составляющих этот путь вершин. Высотой вершины называется длина самого длинного пути из этой вершины до какого-либо листа. Высота дерева совпадает с высотой корня. Глубина вершины определяется как длина пути (который единственный в дереве) от корня до этой вершины.  $N$ -арное дерево (ориентированное) — это ориентированное дерево, в котором число исходящих дуг для любой вершины не превосходит  $N$ . Вершина графа также имеет часто используемый синоним «узел». Д. Кнут приводит следующие критерии сбалансированности деревьев.  $N$ -арное дерево является сбалансированным, если выполнены следующие условия [7, с. 515]: каждый узел имеет не более  $N$  потомков; каждый узел, за исключением корня и листьев, имеет не менее  $N/2$  потомков; корневой узел, если он не является листом, имеет не менее двух потомков; все листья расположены на одном уровне (имеют одинаковую глубину). Более краткое определение сформулировано Г. Адельсон-Вельским и Е. Ландисом [8, с. 248]. Дерево является сбалансированным тогда и только тогда, когда для каждого узла высота его двух поддеревьев различается не более чем на 1. Дерево называется идеально сбалансированным, если для каждой его вершины количества вершин в любом поддереве различаются не более чем на 1 [8, с. 228]. В настоящей статье рассматриваются только ориентированные деревья.

### Способ «Список смежности»

В реляционной модели матрица смежности может быть представлена в виде множества (списка) пар с номерами (идентификаторами, кодами) вершин, где каждая пара определяет ориентированную дугу между вершинами. Способ

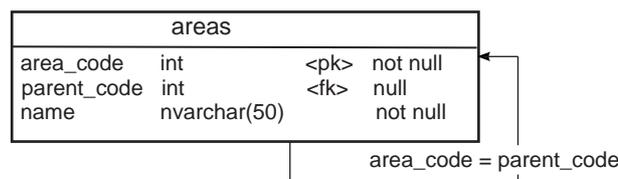
представляет собой интуитивно понятную организацию иерархии в виде таблицы с замкнутой на саму себя связью (рефлексивная связь).

Корневые вершины отличаются от других пар пустой (NULL) ссылкой на предка. В приведенном примере (рис. 1, табл. 1, 2) это поле «Код вышестоящей территории».

Число необходимых элементов для представления матрицы в виде списка и соответствующих ему строк таблицы будет равно порядку графа (числу вершин графа), так как в каждую вершину, кроме корневой, входит только одна дуга. Обозначим это число элементов как  $S_N$ , где  $N$  — число вершин в дереве:

$$S_N = N. \quad (1)$$

Для выполнения часто используемых выборов требуется поддержка рекурсивных запросов. Если СУБД не умеет выполнять такие запросы,



■ Рис. 1. Пример представления данных согласно способу «Список смежности»

■ Таблица 1. Пример заполнения таблицы areas («Список смежности»)

area_code	parent_code	name
1	NULL	Санкт-Петербург
2	1	Центральный район
3	1	Московский район
4	1	Невский район
5	3	МО Новоизмайловское
6	3	МО Кузнецовское
7	4	МО Рыбацкое

■ Таблица 2. Представление в виде матрицы смежности

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

то выборки придется строить с использованием других механизмов, например, временных таблиц или хранимых процедур и функций. Рассмотрим примеры запросов.

**Типовые запросы**

**Листинг 1. Выборка поддерева**

Колонка level отображает глубину узла выбранного поддерева.

```
WITH subtree (area_code, parent_code, name, level)
AS (SELECT area_code, parent_code, name, 0 AS level
FROM areas
WHERE area_code = 3 /* код корня */
UNION ALL
SELECT areas.area_code, areas.parent_code, areas.name, level + 1
FROM areas INNER JOIN subtree
ON areas.parent_code = subtree.area_code
WHERE areas.parent_code IS NOT NULL
)
SELECT area_code, name, level
FROM subtree;
```

Результат выборки поддерева:

area_code	name	level
3	Московский район	0
5	МО Новоизмайловское	1
6	МО Кузнецовское	1

**Листинг 2. Выборка всех предков (путь к узлу от корня)**

```
WITH subtree (area_code, parent_code, name, level)
AS (SELECT area_code, parent_code, name, 0 AS level
FROM areas
WHERE area_code = 5 -- узел
UNION ALL
SELECT areas.area_code, areas.parent_code, areas.name, level + 1
FROM areas
INNER JOIN subtree
ON areas.area_code = subtree.parent_code)
SELECT area_code, name,
(SELECT MAX(level) FROM subtree) - level + 1 AS level
FROM subtree
ORDER BY level;
```

Результат выборки предков:

area_code	name	level
1	Санкт-Петербург	0
3	Московский район	1
5	МО Новоизмайловское	2

**Листинг 3. Проверка, входит ли узел в поддерево**

```
WITH subtree (area_code, parent_code)
AS (SELECT area_code, parent_code
FROM areas
WHERE area_code = 5 /* узел, проверяемый на вхождение */
UNION ALL
```

```
SELECT areas.area_code, areas.parent_code
FROM areas
INNER JOIN subtree
ON areas.area_code = subtree.parent_code)
SELECT CASE
WHEN EXISTS (SELECT 1
FROM subtree
WHERE area_code = 3 /* корень поддерева */)
THEN N'Входит'
ELSE N'Не входит'
END AS result;
```

Результат проверки вхождения узла:  
**result = Входит**

**Листинг 4. Подсчет количества всех потомков узла**

Запрос похож на выборку поддерева с последующим подсчетом количества выбранных узлов.

```
WITH subtree (area_code, parent_code)
AS (SELECT area_code, parent_code
FROM areas
WHERE parent_code = 3 /* код корня */
UNION ALL
SELECT areas.area_code, areas.parent_code
FROM areas INNER JOIN subtree
ON areas.parent_code = subtree.area_code
WHERE areas.parent_code IS NOT NULL
)
SELECT COUNT(1) AS qty
FROM subtree;
```

Результат подсчета количества потомков узла:  
**qty = 2**

**Листинг 5. Определение высоты узла**

```
WITH subtree (area_code, parent_code, level)
AS (SELECT area_code, parent_code, 0 AS level
FROM areas
WHERE area_code = 5 -- узел
UNION ALL
SELECT areas.area_code, areas.parent_code, level + 1
FROM areas INNER JOIN subtree
ON areas.area_code = subtree.parent_code)
SELECT MAX(level) AS level
FROM subtree;
```

Результат определения абсолютного уровня:  
**level = 2**

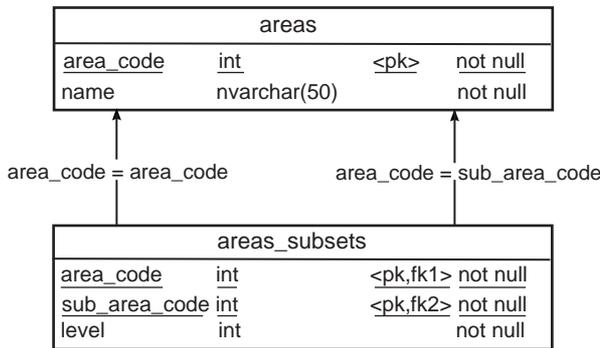
**Способ «Подмножества»**

В этом способе дерево представляется вложенными подмножествами. Корневой уровень включает в себя все подмножества — узлы первого уровня. Узлы первого уровня в свою очередь включают в себя все узлы второго уровня и т. д.

Например, иерархия административно-территориального деления муниципалитета может выглядеть следующим образом (рис. 2).



■ **Рис. 2.** Представление иерархии в виде вложенных подмножеств



■ **Рис. 3.** Пример представления данных согласно способу «Подмножества»

■ **Таблица 3.** Пример заполнения таблицы areas («Подмножества»)

area_code	name
1	Санкт-Петербург
2	Московский район
3	МО Новоизмайловское
4	МО Кузнецовское
5	Невский район
6	МО Рыбацкое
7	Центральный район

В терминах реляционной модели схема будет выглядеть, как на рис. 3 (пример заполнения — в табл. 3).

В способе «Подмножества» каждый элемент, кроме ссылки на непосредственных потомков, содержит ссылки и на потомков всех последующих уровней иерархии (табл. 4).

Если представить граф в матричном виде, то на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца стоит 1, если вершины  $i$  и  $j$  смежны;  $n < N$ , если существует путь от  $i$  к  $j$  длиной  $n$ , или 0 в остальных случаях. Назовем такую матрицу смежности расширенной (табл. 5).

Очевидно, что по сравнению с обычной матрицей смежности (см. табл. 2) расширенная матри-

■ **Таблица 4.** Пример заполнения таблицы area\_subsets («Подмножества»)

area_code	sub_area_code	level
1	1	0
1	2	1
1	3	2
1	4	2
1	5	1
1	6	2
1	7	1
2	2	0
2	3	1
2	4	1
3	3	0
4	4	0
5	5	0
5	6	1
6	6	0
7	7	0

■ **Таблица 5.** Представление в виде расширенной матрицы смежности

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	2	2	1	2	1
2	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ца содержит избыточные значения  $n > 1$ . Количественная оценка избыточности будет напрямую зависеть от сбалансированности дерева.

В случае совершенно несбалансированного дерева все вершины находятся на одном пути между корнем и единственным листом. Пусть вершины пронумерованы от 1 (корень) до  $N$  (лист). В этом случае расширенная матрица будет целиком заполнена выше главной диагонали. Количество элементов списка (и строк таблицы) будет равно сумме арифметической прогрессии от 0 (из листа не исходят дуги) до  $N - 1$  (из корня есть пути во все вершины кроме него самого):

$$S_N = ((N - 1) / 2) N. \quad (2)$$

В случае идеально сбалансированного  $k$ -арного дерева каждая вершина, согласно определению, будет иметь не менее  $(k/2)L$  и не более  $kL$  путей к потомкам, где  $L$  — высота вершины.

Распределение элементов по уровням показано в табл. 6.

■ **Таблица 6.** Распределение вершин в идеально сбалансированном дереве

Высота	Максимальное количество элементов уровня
0	$k^0 = 1$
1	$k^1 = k$
2	$k^2$
3	$k^3$
...	

Количество внешних вершин  $N_T$  не может превышать

$$N_T \leq k^h, \quad (3)$$

где  $h$  — высота дерева. Тогда количество элементов списка (и строк таблицы) можно оценить так:

$$S_N \leq (N - N_T) \cdot k/2. \quad (4)$$

Таким образом, оценка избыточности будет зависеть от сбалансированности дерева и варьироваться от (4) в наилучшем случае до (2) в наихудшем.

Избыточность данных приводит к необходимости дополнительной поддержки их целостности императивно, триггерами, перезаписывающими список и уровни предков данного узла при его вставке или перемещении. Для операции удаления достаточно декларативной ссылочной целостности (каскадное удаление).

Типовые запросы показывают преимущества, полученные от избыточности хранения: запросы стали короткими и простыми, не содержат соединения с другими таблицами, что обеспечивает их эффективность на любой СУБД.

### Типовые запросы

#### Листинг 6. Выборка поддерев

```
SELECT areas.area_code, areas.name, area_subsets.level
FROM area_subsets INNER JOIN areas
ON area_subsets.sub_area_code = areas.area_code
WHERE area_subsets.area_code = 2 -- корень поддерева
ORDER BY level;
```

Результат выборки поддерева:

area_code	name	level
2	Московский район	0
3	МО Новоизмайловское	1
4	МО Кузнецовское	1

#### Листинг 7. Выборка предков

```
SELECT areas.area_code, areas.name,
(SELECT MAX(s.level)
FROM area_subsets s
WHERE s.sub_area_code = area_subsets.sub_area_code)
- area_subsets.level + 1 AS level
```

```
FROM area_subsets
INNER JOIN areas
ON area_subsets.area_code = areas.area_code
WHERE area_subsets.sub_area_code = 3 -- узел
ORDER BY level;
```

Результат выборки предков:

area_code	name	level
1	Санкт-Петербург	0
2	Московский район	1
3	МО Новоизмайловское	2

#### Листинг 8. Вхождение в поддерев

```
SELECT result = CASE
WHEN EXISTS(
SELECT 1 FROM area_subsets
WHERE sub_area_code = 4 /* узел */
AND area_code = 2 /* корень поддерева */)
THEN N'Входит'
ELSE N'Не входит'
END
```

Результат проверки вхождения узла:

**result = Входит**

#### Листинг 9. Подсчет количества всех потомков узла

```
SELECT COUNT(1) - 1 AS qty
FROM area_subsets
WHERE area_code = 2 /* корень поддерева */
```

Результат подсчета количества потомков узла:

**qty = 2**

#### Листинг 10. Определение высоты узла

```
SELECT MAX(level) AS level
FROM area_subsets
WHERE sub_area_code = 4 /* узел */
```

Результат определения абсолютного уровня:

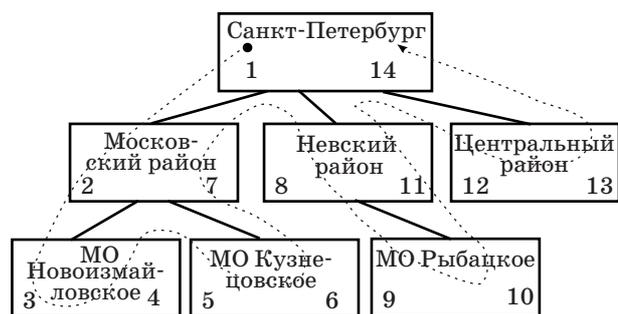
**level = 2**

### Способ «Маршрут обхода»

Согласно теории графов, для обхода дерева существует три способа: можно проходить узлы в префиксном, в инфиксном и в суффиксном порядке.

Префиксный порядок обхода дерева рекурсивно определяется так: сначала корень дерева, потом узлы левого поддерева в префиксном порядке, наконец, узлы правого поддерева в префиксном порядке. Пример обхода в префиксном порядке приведен на рис. 4.

Хранение маршрута обхода дерева в префиксном порядке также встречается у Джо Селко [9],



■ Рис. 4. Маршрут обхода дерева в префиксном порядке

areas			
area_code	int	<pk>	not null
input_code	int		not null
output_code	int		not null
name	nvarchar(50)		not null

■ Рис. 5. Пример представления данных согласно способу «Маршрут обхода»

■ Таблица 7. Пример заполнения таблицы areas («Маршрут обхода»)

area_code	name	input_code	output_code
1	Санкт-Петербург	1	14
2	Московский район	2	7
3	МО Новоизмайловское	3	4
4	МО Кузнецовское	5	6
5	Невский район	8	11
6	МО Рыбацкое	9	10
7	Центральный район	12	13

однако там способ носит не соответствующее его сути название «Вложенные множества» (nested sets).

Каждый квадрат на рис. 4 обозначает узел, цифра в левом его углу является порядковым номером этапа маршрута при входе в узел, а цифра справа — номером при выходе, когда тем же способом пройдены все потомки. Соответствующая структура таблицы показана на рис. 5, а пример содержания — в табл. 7. Нетрудно заметить, что номера потомков всегда располагаются в интервале между соответствующими номерами предка, сколь угодно дальнего. Храня порядок обхода дерева, этим свойством можно воспользоваться в типовых запросах, избежав рекурсии.

Оценка избыточности хранения по сравнению со способом «Список смежности» очевидна: вместо одного номера вершины предка каждый

элемент матрицы будет хранить упорядоченную пару номеров:

$$S_N = N \cdot 2. \quad (5)$$

Избыточность хранения делает необходимым пересчет порядка обхода при добавлении новых или перемещении существующих узлов (удаление можно игнорировать). В триггере придется реализовать последовательный порядок обхода. Но, например, если добавляется элемент самого нижнего уровня, то придется пересчитать все номера «выше» или «правее», что может быть сравнимо с затратами на пересчет маршрута по всему дереву.

Если нумеровать входы и выходы из узлов с некоторым интервалом, например 100 или 1000, что в значительной степени зависит от предварительных оценок количества хранимых узлов дерева, то вставка новых элементов будет происходить без полной перенумерации всех последующих.

### Типовые запросы

#### Листинг 11. Выборка поддерев

В запросе не вычисляется глубина узла. Добавление этой функции приведет к введению выполняющегося для каждого элемента агрегирующего подзапроса (см. листинг 15).

```
SELECT a1.area_code, a1.input_code, a1.name
FROM areas a1
INNER JOIN areas a2
ON a1.input_code BETWEEN a2.input_code AND a2.output_code
WHERE a2.area_code = 2 /* корень поддерева */
ORDER BY a1.input_code
```

#### Результат выборки поддерева:

area_code	input_code	name
2	2	Московский район
3	3	МО Новоизмайловское
4	5	МО Кузнецовское

#### Листинг 12. Выборка предков

Выборка всех предков симметрична предыдущему запросу относительно BETWEEN. В запросе не вычисляется глубина узла.

```
SELECT a1.area_code, a1.input_code, a1.name
FROM areas a1 INNER JOIN areas a2
ON a2.input_code BETWEEN a1.input_code AND a1.output_code
WHERE a2.area_code = 4 /* узел */
ORDER BY a1.input_code
```

#### Результат выборки предков:

area_code	input_code	name
1	1	Санкт-Петербург
2	2	Московский район
4	5	МО Кузнецовское

**Листинг 13. Вхождение в поддерево**

```
SELECT result = CASE
  WHEN EXISTS(SELECT 1 FROM areas as a1, areas as a2
    WHERE a1.area_code = 4 /* узел */
      AND a2.area_code = 2 /* корень поддерева */
      AND a1.input_code BETWEEN a2.input_code AND a2.output_code)
  THEN N'Входит'
  ELSE N'Не входит'
END
```

Результат проверки вхождения узла:  
**result = Входит**

**Листинг 14. Подсчет количества всех потомков узла**

```
SELECT COUNT(1) AS qty
FROM (SELECT a1.area_code
FROM areas a1 INNER JOIN areas a2
  ON a1.input_code BETWEEN a2.input_code AND a2.output_code
WHERE a2.area_code = 2 /* узел */) t
```

Результат подсчета количества потомков узла:  
**qty = 2**

**Листинг 15. Определение высоты узла**

```
SELECT COUNT(1) AS level
FROM (SELECT a1.area_code
FROM areas a1 INNER JOIN areas a2
  ON a2.input_code BETWEEN a1.input_code AND a1.output_code
WHERE a2.area_code = 4 /* узел */) t
```

Результат определения абсолютного уровня:  
**level = 1**

■ **Таблица 8.** Пример заполнения таблицы areas («Материализованные пути»)

area_path	name
1	Санкт-Петербург
1.1	Московский район
1.1.1	МО Новоизмайловское
1.1.2	МО Кузнецовское
1.2	Невский район
1.2.1	МО Рыбацкое
1.3	Центральный район

areas			
area_path	varchar(50)	<pk>	not null
name	nvarchar(50)		not null

■ **Рис. 6.** Пример представления данных способом «Материализованные пути»

**Способ «Материализованные пути»**

Суть способа заключается в хранении пути от вершины до данного узла в явном виде и в качестве ключа. Например, ранее приведенная на рис. 2 иерархия территорий могла бы выглядеть следующим образом, схожим с нумерацией частей, разделов и глав в книге (табл. 8).

Данный способ является наиболее наглядным с точки зрения кодификации элементов: каждый узел получает значение, которое пригодно для непосредственного восприятия пользователем, сам код и его части несут смысловую нагрузку. Подобные свойства являются важными в классификациях, предназначенных для широкого использования, например, в стандартизованных справочниках территорий (ОКАТО), отраслей экономики (ОКВЭД, NAICS), медицинских диагнозов (МКБ — международный классификатор болезней) и во многих других областях.

Оценка избыточности хранения аналогична таковой для способа «Подмножества»: расширенная матрица смежности содержит те же элементы (рис. 6).

Ограничив максимальное количество уровней иерархии и число прямых потомков, можно обойтись без разделителей, используя символичные коды с фиксированной разбивкой на группы разрядов. Пустые лидирующие разряды в группе заполняются нулями.

Однако запросы не всегда могут быть эффективно реализованы на уровне СУБД, так как, например, поиск подстроки вызывает сканирование таблицы вместо поиска по ключу или его начальному фрагменту.

**Листинг 16. Выборка поддерева**

В запросе не вычисляется глубина узла.

```
SELECT *
FROM areas
WHERE area_path LIKE '1.1%' /* корень поддерева */
ORDER BY area_path
```

Результат выборки поддерева:

area_path	name
1.1	Московский район
1.1.1	МО Новоизмайловское
1.1.2	МО Кузнецовское

**Листинг 17. Выборка предков**

В запросе не вычисляется глубина узла.

```
SELECT *
FROM areas
WHERE '1.2.1' /* узел */ LIKE area_path + '%'
ORDER BY area_path
```

Результат выборки предков:

area_path	name
1	Санкт-Петербург
1.2	Невский район
1.2.1	МО Рыбацкое

**Листинг 18. Вхождение в поддерево**

```
WITH
node(area_path) AS (SELECT '1.2.1'),
subtree(area_path) AS (SELECT '1.2')
SELECT result = CASE
WHEN EXISTS(SELECT 1
FROM node, subtree
WHERE SUBSTRING(node.area_path, 1, LEN(subtree.area_path))
= subtree.area_path)
```

```
THEN N'Входит'
ELSE N'Не входит'
END
```

Результат проверки вхождения узла:  
**result** = Входит

**Листинг 19. Подсчет количества всех потомков узла**

```
SELECT COUNT(1) - 1 AS qty
FROM areas
WHERE area_path LIKE '1.1%' /* корень поддерева */
```

Результат подсчета количества потомков узла:  
**qty** = 2

■ **Таблица 9.** Сравнительные характеристики рассмотренных способов

Критерии сравнения	Списки смежности	Подмножества	Хранение маршрута обхода	Материализованные пути
<b>Сложность схемы базы данных (количество)</b>				
Таблицы	1	2	1	1
Ссылки	1	2	0	0
Колонки	3	5	4	2
<b>Запросы на извлечение данных (число соединений)</b>				
Выборка поддерева, число соединений	$H - N + 1$ (*)	2	2	1
Выборка пути от узла до корня (предков)	$N$ (*)	2	2	1
Вхождение в поддерево	$H - N + 1$ (*)	1	2	0 (сравнение значений двух строк)
Подсчет количества всех потомков узла	$H - N + 1$ (*)	1	2	1
Определение высоты узла	$N$ (*)	1	2	1
Соответствие порядка следования узлов сортировке по ключу	Нет	Нет	Нет	Да
<b>Запросы на изменение данных</b>				
Прямая вставка новых узлов для листа	Да	Нет	Да, если есть свободный номер, иначе пересчет диапазонов	Да
Прямая вставка новых узлов для внутренней вершины	Нет, изменение ссылки потомков	Нет, перегруппировка подмножеств	Нет, пересчет диапазонов	Нет, пересчет номеров узлов
Прямое перемещение поддерева	Да, изменение ссылки на предка	Нет, перегруппировка подмножеств	Нет, пересчет диапазонов	Нет, пересчет номеров узлов
Прямое удаление поддерева	Нет, рекурсивное (каскадная DRI)	Нет, перегруппировка подмножеств	Да, заданием диапазона	Да, заданием шаблона подстроки
Избыточность хранения	Нет	Да	Да	Да
Оценка избыточности хранения дерева из $N$ вершин	$N$	Не хуже $((N - 1)/2)N$	$2N$	Не хуже $((N - 1)/2)N$
Ограничения высоты дерева	Нет	Нет	Нет	Да
Императивная поддержка целостности	Нужна	Нужна	Нужна	Нужна

Примечание: (\*) — рекурсивный запрос,  $H$  — высота дерева,  $N$  — текущий уровень.

**Листинг 20. Определение высоты узла**

```
SELECT COUNT(1) AS level
FROM areas
WHERE '1.1.2' /* узел */ LIKE area_path + '%'
```

Результат определения абсолютного уровня:  
**level = 3**

**Критерии сравнения**

В качестве критериев сравнения приведенных способов предлагается использовать следующие характеристики:

- сложность схемы базы данных;
- запросы на извлечение данных;
- запросы на изменение данных;
- избыточность хранения данных;
- поддержка целостности данных.

Сложность схемы базы данных определяется как количество достаточных для реализации таблиц, ссылок (связей) между ними и колонок, содержащих данные о структуре графа (матрице смежности). Запросы на извлечение данных характеризуются количеством необходимых соединений. Наиболее сложным вариантом является рекурсивный запрос, в котором число соединений в цикле соответствует глубине иерархии. Например, выборка поддерева с пятью уровнями будет осуществляться в цикле из пяти итераций, результат каждой из которых соединяется с предыдущим. Запросы на изменение данных, такие как вставка и удаление узлов, характеризуются необходимостью дополнительных операций со связанными узлами и обновлением избыточных данных. Поддержка целостности данных характеризуется необходимостью дополнительного императивного кода (триггеров) помимо декларативной ссылочной целостности.

Сведя перечисленные характеристики в одну общую таблицу (табл. 9), мы получим сравнительную картину, предназначенную для выбора одного из способов реализации.

**Заключение**

В статье рассмотрены основные способы организации иерархических структур в реляционных базах данных и их характеристики. Важно отметить, что нет «плохих» или «хороших»

способов: проектировщик сможет сделать выбор оптимального решения, исходя из условий конкретной задачи на основании предлагаемого множества критериев.

Несмотря на относительно небольшое количество шаблонов логического уровня по сравнению, например, с объектно-ориентированным проектированием, где их выделено более 40 [10], систематизация таковых в применении к базам данных является необходимым шагом как для индустриализации процесса проектирования, так и для обучения.

Предлагаемую классификацию способов плоского представления иерархических данных предполагается использовать в исследованиях, финансируемых грантом Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский фонд фундаментальных исследований» № 13-08-01250.

**Литература**

1. Ульман Дж. Основы систем баз данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 334 с.
2. Карпова Т. С. Базы данных: модели, разработка, реализация. – СПб.: Питер, 2001. – 304 с.
3. Бураков В. В. Управление качеством программных средств: монография. – СПб.: ГУАП, 2009. – 287 с.
4. Бураков В. В. Концептуальное моделирование качества программных средств // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 7. С. 54–60.
5. Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И. Лекции по теории графов. – М.: Наука, 1990. – 384 с.
6. Ахо Д., Хопкрофт Д., Ульман Д. Структуры данных и алгоритмы. – М.: Вильямс, 2000. – 384 с.
7. Кнут Д. Искусство программирования. 2-е изд. Т. 3. Сортировка и поиск. – М.: Вильямс, 2007. – 824 с.
8. Вирт Н. Алгоритмы + Структуры данных = Программы. – М.: Мир, 1985. – 408 с.
9. Celko J. Trees and Hierarchies in SQL for Smarties. – Morgan-Kaufmann, 2012. – 296 p.
10. Гамма Э. и др. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб.: Питер, 2013. – 368 с.

УДК 004.056

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ УТЕЧКИ ПОЛНОМОЧИЙ В СИСТЕМАХ С РОЛЕВЫМ РАЗГРАНИЧЕНИЕМ ДОСТУПА

**С. В. Белим,**

доктор физ.-мат. наук, профессор

**Н. Ф. Богаченко,**

канд. физ.-мат. наук, доцент

Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского

Исследуется вопрос наличия у пользователей избыточных полномочий в компьютерных системах с ролевым разграничением доступа. Для оценки рисков утечки полномочий применяется метод анализа иерархий. Метод основывается на иерархической структуре множества ролей. Дается оценка трудоемкости предложенного алгоритма. Показано, что предложенная методика позволяет ранжировать определенные в системе полномочия по величине рисков их утечки. При этом все расчеты ведутся, исходя из особенностей построения самой системы, без привлечения механизма экспертных оценок. Связь метода анализа иерархий и ролевого дерева системы разграничения доступа дает возможность получить дополнительную информацию в ситуации, когда альтернативные решения не удается описать какими-либо точными функциональными зависимостями, а также избавляет метод от несогласованности и субъективизма суждений экспертов.

**Ключевые слова** — ролевое разграничение доступа, утечка полномочий, метод анализа иерархий, трудоемкость алгоритма.

## Введение

Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при построении систем разграничения доступа, является проблема скрытых каналов утечки информации. Скрытым каналом утечки информации называется механизм, при помощи которого в компьютерной системе может осуществляться передача информации между сущностями в обход политики разграничения доступа [1].

Вместе с тем любая модель разграничения доступа должна предусматривать в том числе формальное доказательство невозможности недопустимых информационных потоков [1]. Но подобные доказательства в большинстве своем основываются на каком-то одном критерии безопасности. Таким критерием, например, может являться «невозможность осуществления доступа субъектов к объектам вне явных разрешений». За пределами доказательства остаются неявные информационные потоки, которые обусловлены скрытыми каналами утечки информации. Таким образом, доказательство отсутствия

«опасных» доступов и анализ скрытых каналов утечки информации — это две составляющие любой системы разграничения доступа.

Применительно к ролевой политике безопасности, для развития которой предложено множество модификаций и расширений [2—5], в первую очередь необходим анализ проблемы наличия у пользователей избыточных полномочий (прав доступа и привилегий). Очевидно, именно этот показатель является определяющим при оценке возможности несанкционированной передачи информации.

Далее в статье рассматриваются системы с иерархической организацией множества ролей [1, 6], содержащие в своем описании ориентированный (ролевой) граф, который чаще всего используется лишь для контроля наследования ролями выданных им полномочий. Предлагается на основе ролевого графа получать дополнительную информацию, необходимую для анализа защищенности системы. Большинство подходов к анализу графов доступа к информационным ресурсам связано с исследованием графов атак моделей с дискреционным разграничением досту-

па [7]. В более общем случае для анализа защищенности информационно-управляющих систем может быть построен граф реализации угроз [8]. К сожалению, основная масса работ посвящена синтезу подобных графов и лишь единицы — формальным моделям их анализа. Чаще всего это использование стандартных методов анализа ориентированных графов [9] либо другие поисковые алгоритмы, например рекурсивный алгебраический анализ [10]. Как будет показано далее, иерархическая организация множества ролей в компьютерной системе с ролевым разграничением доступа позволяет для решения задачи оценки рисков утечки полномочий применить метод анализа иерархий, широко используемый в системах поддержки принятия решений [11, 12].

### Иерархическая организация множества ролей и постановка задачи

Пусть компьютерная система определяется набором из четырех множеств:  $U$  — множество пользователей,  $R$  — множество ролей,  $P$  — множество полномочий (прав, привилегий),  $S$  — множество сеансов работы пользователей в системе. Вместе с ролью пользователь получает некоторый набор (список) полномочий, закрепленных за выданной ролью. Можно выделить три основных вопроса организации ролевого доступа [6, с. 175]:

1) сколько и каких ролей может быть назначено одному пользователю;

2) сколько и каких ролей может задействовать пользователь в одном сеансе работы с системой (на какие роли может быть авторизован пользователь);

3) возможно ли делегирование (передача) полномочий от одних ролей другим ролям?

В зависимости от способов решения поставленных вопросов существует несколько разновидностей ролевых моделей. Наиболее распространенной является модель с *иерархической* организацией множества ролей. При этом старшая в иерархии роль получает полномочия непосредственно подчиненных ей ролей.

Обозначим множество (список, набор) полномочий, приписанных некоторой роли  $r$ , как  $r.p$ . Тогда модель с иерархической системой ролей определяется следующими уточнениями и дополнениями.

1. На множестве ролей вводится отношение частичного порядка, задающее оператор доминирования/подчинения ролей « $\geq$ »: если  $r_1 \geq r_2$ , то роль  $r_1$  находится в иерархии выше, чем роль  $r_2$ , и множество полномочий  $r_1.p$  включает в себя множество полномочий  $r_2.p$ .

2. Если пользователю  $u$  назначена роль  $r$ , то автоматически ему назначаются и все роли, подчиненные  $r$ . Если пользователь  $u$  в текущем сеансе работы системы авторизован на роль  $r$ , то он автоматически авторизуется и на все роли, подчиненные  $r$ . Набор полномочий, доступных пользователю по всем ролям, на которые он авторизован в текущем сеансе работы системы, определяется с учетом подчиненных ролей.

Иерархию ролей удобно описывать помеченным ориентированным графом (назовем его *ролевым*), в котором вершины соответствуют имеющимся в системе ролям, метки вершин представляют собой наборы полномочий этих ролей, дуги задают отношение доминирования/подчинения ролей. Как правило, считается, что ролевой граф является ориентированным деревом. На самом деле этот факт не столь очевиден, и в более общем случае достаточно потребовать, чтобы иерархия была описана ориентированным ациклическим графом [13]. Но в рамках данной статьи нам требуется именно древовидность ролевого графа. Стоит отметить, что в работе [13] представлен алгоритм преобразования произвольного ориентированного графа без циклов, описывающего иерархию ролей, в эквивалентное ему дерево.

Итак, пусть иерархия ролей задана ориентированным деревом  $T$ . На этом этапе анализа проблемы будем считать, что в иерархии ролей полномочия непосредственно получают только листовые вершины, а далее полномочия распределяются по принципу наследования (используется строгий или нестрогий таксономический подход к распределению полномочий [6]).

Поставим задачу оценки относительных вероятностей (*рисков*) утечки полномочий в системе. Очевидно, что вероятность  $P(p_i)$  должна зависеть как от распространенности полномочия  $p_i$  в системе, так и от значимости ролей, которым приписано это полномочие (т. е. от иерархической организации множества  $R$ ).

Наша цель — для каждого элемента  $p_i$  множества полномочий  $P$  вычислить вероятность его утечки  $P(p_i)$ . При этом будем исходить из следующих эвристических предположений.

**Предположение 1.** Чем чаще встречается данное полномочие в списках полномочий ролей, тем больше вероятность его утечки.

**Предположение 2.** Чем больше полномочий содержит данная роль, тем больше вероятность атаки на нее.

### Метод оценки вероятностей утечки полномочий

Дополним дерево  $T$  еще одним уровнем, присоединив к каждой листовой вершине  $r_l$  дополни-

тельные вершины, содержащие ровно одно полномочие (из множества полномочий  $r_{l,p}$  вершины  $r_l$ ), тем самым получим *расширенное* дерево  $T_p$ .

Число полномочий, приписанных вершине  $r_i$ , для удобства записи обозначим  $|r_i.p|$ .

Оценим вероятности утечки полномочий с помощью метода анализа иерархий, хорошо известного из теории принятия решений [11, 12].

**Этап 1.** Вычислим *относительные* весовые коэффициенты (веса) всех вершин (кроме корня) дерева  $T_p$ . Расчет весов происходит при движении от корня к листовым вершинам. При этом на каждом шаге рассматривается подмножество ролей, подчиненных одной роли предыдущего уровня, и для каждого такого подмножества строится *матрица парных сравнений*, обозначим ее  $M$ . Размерность  $k$  матрицы  $M$  равна мощности выделенного подмножества подчиненных ролей. Коэффициент  $m_{ij}$  в матрице парных сравнений, отвечающий паре  $(r_i, r_j)$ , равен отношению числа полномочий роли  $r_i$  к числу полномочий роли  $r_j$ :  $m_{ij} = |r_i.p|/|r_j.p|$ . С учетом приведенных выше предположений величина  $m_{ij}$  характеризует степень предпочтительности роли  $r_i$  по сравнению с ролью  $r_j$  с точки зрения злоумышленника. Диагональные элементы  $m_{ii}$  приравниваются 1. Далее нормируются столбцы матрицы  $M$ , при этом элементы  $m_{ij}^*$  новой нормированной матрицы  $M^*$  вычисляются по формуле  $m_{ij}^* = m_{ij}/(m_{1j} + \dots + m_{kj})$ . Вес каждой роли  $r_i$  рассчитывается как среднее арифметическое соответствующей этой роли строки в нормированной матрице  $M^*$ :  $w_i = (m_{i1}^* + \dots + m_{ik}^*)/k$ .

При таком подходе к заполнению матрицы парных сравнений, когда ее элементы  $m_{ij}$  вычисляются, исходя из структуры иерархии ролей, без привлечения механизма экспертных оценок, обеспечивается *идеальная согласованность* матрицы  $M$ : ее элементы связаны равенствами  $m_{ij} = m_{is} \times m_{sj}$  (для любых  $i, j, s$ ). Действительно:  $m_{is} \times m_{sj} = |r_i.p|/|r_s.p| \times |r_s.p|/|r_j.p| = |r_i.p|/|r_j.p| = m_{ij}$ . Так как матрица  $M$  идеально согласована, то после нормировки столбцы матрицы  $M^*$  становятся одинаковыми [11, 12]. Следовательно,  $w_i = m_{ij}^*$  для любого  $j$ . Не ограничивая общности, далее будем работать с элементами первого столбца матрицы  $M$ :

$$w_i = m_{i1}^* = m_{i1}/(m_{11} + \dots + m_{k1}) = (|r_i.p|/|r_1.p|)/(|r_1.p|/|r_1.p| + \dots + |r_k.p|/|r_1.p|).$$

Тогда

$$w_i = |r_i.p|/(|r_1.p| + \dots + |r_k.p|), i = 1, \dots, k$$

или в векторном виде

$$W = P / \|P\|.$$

Таким образом мы показали, что относительные весовые коэффициенты могут быть вычислены без построения матрицы парных сравнений, лишь на основе знания некоторых числовых характеристик (в нашем случае это координаты *вектора полномочий P*), приписанных сравниваемым факторам (ролям). Тем самым в рассматриваемой задаче метод анализа иерархий основывается только на свойствах самой системы, что освобождает его от «модельной» ошибки, возникающей из-за несогласованности суждений экспертов [14].

**Этап 2.** Найдем *комбинированные* весовые коэффициенты листовых вершин дерева  $T_p$ , которые и будут являться относительными вероятностями (*рисками*) утечки полномочий: для каждого полномочия вероятность утечки равна сумме произведений относительных весовых коэффициентов вершин по всем путям от корня до листьев, содержащих данное полномочие.

### Алгоритм расчета рисков утечки полномочий

Выпишем формально алгоритм вычисления вероятностей (рисков) утечки полномочий в реальной системе. Пусть помеченное ориентированное дерево  $T$ , определяющее иерархию ролей, содержит  $n$  вершин  $r_1, \dots, r_n$  и пусть в системе определено  $m$  полномочий  $p_1, \dots, p_m$ . Алгоритм по шагам можно записать в следующем виде.

1. Каждой вершине  $r_i$  ролевого дерева  $T$  поставить в соответствие величину  $|r_i.p|$ , равную числу полномочий, приписанных этой вершине.

2. Построить расширенное ролевое дерево  $T_p$ : к каждой листовой вершине  $r_l$  ролевого дерева  $T$  добавить столько вершин-полномочий, сколько содержится в ее множестве полномочий  $r_l.p$ ; каждую из новых вершин наделить одним полномочием из множества полномочий  $r_l.p$  и сопоставить ей числовую характеристику (см. шаг 1), равную единице.

3. Для каждой нелистовой вершины  $t_i$  дерева  $T_p$ , начиная с корня, рассмотреть подмножество подчиненных ей вершин:  $\{t_{i_1}, \dots, t_{i_k}\}$ . Для вершин этого подмножества вычислить относительные весовые коэффициенты (веса)  $w_j$  по формуле

$$w_j = \frac{|t_{i_j}.p|}{|t_{i_1}.p| + \dots + |t_{i_k}.p|}, j = 1, \dots, k.$$

4. Для каждого полномочия  $p_i$  рассчитать комбинированный весовой коэффициент или вероятность (риск) его утечки:

$$P(p_i) = \sum_{\rho(t, t_s): (t_s - \text{лист}) \wedge (t_s.p = \{p_i\})} \left( \prod_{j: t_j \in \rho(t, t_s)} w_j \right).$$

Здесь сумма берется по всем ориентированным путям  $\rho(t, t_s)$  в дереве  $T_p$ , ведущим от корня  $t$  к такому листу  $t_s$ , список полномочий  $t_s.p$  которого содержит единственное полномочие  $p_i$  (очевидно, это те вершины-полномочия, которые были добавлены к исходному ролевому дереву  $T$  и которые соответствуют полномочию  $p_i$ ). В каждом произведении участвуют вычисленные на шаге 3 относительные весовые коэффициенты  $w_j$  тех вершин  $t_j$ , которые составляют ориентированный путь  $\rho(t, t_s)$  (исключая корень  $t$ , так как для него вес не определен).

**Замечание.** Несложно показать, что

$$\sum_{i=1}^m P(p_i) = 1. \text{ Следовательно, так как } P(p_i) \geq 0, \text{ то } P(p_i) \leq 1 \text{ (} i=1, \dots, m \text{).}$$

Оценим алгоритмическую сложность представленного алгоритма.

**Утверждение.** Трудоемкость алгоритма расчета рисков утечки полномочий, основанного на методе анализа иерархий, равна  $O((n \times m)^2)$ , где  $n$  — число ролей,  $m$  — число полномочий в системе.

**Доказательство:** Обозначим трудоемкость  $i$ -го шага алгоритма  $T_i$ . Тогда общая трудоемкость алгоритма  $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$ .

В качестве структуры для задания ориентированного дерева выберем массив списков смежности [15]. При этом для каждой вершины помимо списка подчиненных ей вершин будем хранить индекс ее родителя. Так как дерево будет в дальнейшем дополнено новыми вершинами-листьями, размерность массива следует задать в соответствии с максимально возможным числом вершин расширенного дерева (эта величина будет оценена далее).

Очевидно, что независимо от способа хранения множества полномочий, сопоставленного каждой роли,  $T_1 = O_1(n \times m)$ ; так как число вершин в исходном дереве равно  $n$ , для каждой из них просмотр ее множества полномочий можно осуществить не более чем за  $m$  шагов.

На втором шаге надо просмотреть  $n$  вершин исходного дерева  $T$ , каждая из которых может породить (если ее список смежности пуст) не более  $m$  вершин-полномочий в расширенном дереве  $T_p$ . При реализации дерева в виде списков смежности добавление новой вершины происходит за конечное число операций, не зависящее от числа вершин. Следовательно:  $T_2 = O_2(n \times m)$ .

Заметим, что теперь число листьев в расширенном ролевом дереве не превосходит  $n \times m$ , а общее число вершин не превосходит  $n + n \times m = O(n \times m)$ .

Вершины, подчиненные текущей, хранятся в ее списке смежности. Таким образом, для каж-

дого списка смежности необходимо применить формулу третьего шага алгоритма. Суммарное число вершин во всех списках смежности, задающих ориентированное дерево, равно числу его ребер, что на единицу меньше числа вершин [15]. Так как  $T_p$  — это дерево, то на шаге 3 каждая вершина, для которой вычисляется вес, будет рассмотрена ровно один раз. Тогда  $T_3 = O_3(n \times m)$ .

На последнем шаге необходимо найти ориентированные пути от корня до листовых вершин дерева  $T_p$  (в дереве до любой вершины существует единственный ориентированный путь из корня [15]). Для каждого пути вычисляется произведение весов входящих в него вершин. Далее это произведение участвует в сумме, отвечающей тому полномочию, которое приписано конечной листовой вершине этого пути. Так как для каждой вершины известен индекс ее родителя, то трудоемкость восстановления пути (при движении от листа к корню) и вычисления соответствующего множителя равна  $O(n \times m)$ . Общее число множителей по всем суммам равно числу листьев в дереве  $T_p$ . Следовательно:  $T_4 = O_4((n \times m)^2)$ .

Получаем:  $T = O_1(n \times m) + O_2(n \times m) + O_3(n \times m) + O_4((n \times m)^2) = O((n \times m)^2)$ . Что и требовалось доказать.

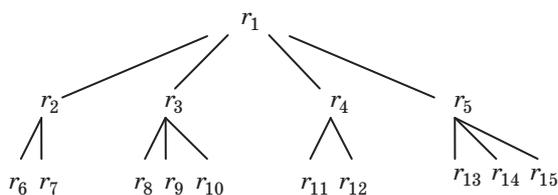
### Пример анализа иерархии ролей

Рассмотрим применение предложенного алгоритма на примере иерархии ролей, представленной на рис. 1.

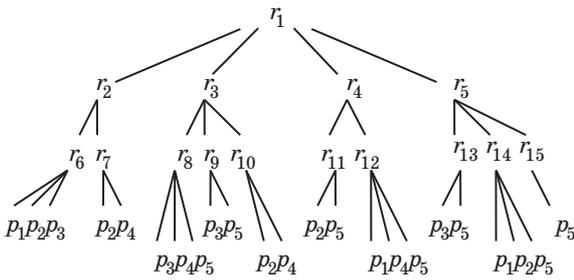
Пусть используется нестрогий таксономический подход к распределению полномочий, и полномочия листовых ролей имеют следующие значения:  $r_{6.p} = \{p_1, p_2, p_3\}$ ,  $r_{7.p} = \{p_2, p_4\}$ ,  $r_{8.p} = \{p_3, p_4, p_5\}$ ,  $r_{9.p} = \{p_3, p_5\}$ ,  $r_{10.p} = \{p_2, p_4\}$ ,  $r_{11.p} = \{p_2, p_5\}$ ,  $r_{12.p} = \{p_1, p_4, p_5\}$ ,  $r_{13.p} = \{p_3, p_5\}$ ,  $r_{14.p} = \{p_1, p_2, p_5\}$ ,  $r_{15.p} = \{p_5\}$ .

Для остальных ролей получаем полномочия из условия наследования:  $r_{2.p} = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ ,  $r_{3.p} = \{p_2, p_3, p_4, p_5\}$ ,  $r_{4.p} = \{p_1, p_2, p_4, p_5\}$ ,  $r_{5.p} = \{p_1, p_2, p_3, p_5\}$ ,  $r_{1.p} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$ .

Дополняя дерево  $T$  листьями-полномочиями, получаем иерархию, представленную расширенным ролевым деревом (рис. 2).



■ Рис. 1. Ролевое дерево  $T$



■ Рис. 2. Расширенное ролевое дерево

Сначала строим вектор  $\mathbf{P}_{2,3,4,5}$  для набора ролей  $\{r_2, r_3, r_4, r_5\}$  и определяем относительные весовые коэффициенты  $w_2, w_3, w_4, w_5$ . Так как все эти роли содержат по четыре полномочия, то получаем  $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = 0,25$ .

Далее строим векторы полномочий следующего уровня иерархии:  $\mathbf{P}_{6,7}$  — для ролей  $\{r_6, r_7\}$ ,  $\mathbf{P}_{8,9,10}$  — для ролей  $\{r_8, r_9, r_{10}\}$ ,  $\mathbf{P}_{11,12}$  — для ролей  $\{r_{11}, r_{12}\}$  и  $\mathbf{P}_{13,14,15}$  — для ролей  $\{r_{13}, r_{14}, r_{15}\}$ :

$$\mathbf{P}_{6,7} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_{8,9,10} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_{11,12} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{P}_{13,14,15} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

После нормировки векторы относительных весовых коэффициентов принимают следующий вид:

$$\mathbf{W}_{6,7} = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W}_{8,9,10} = \begin{pmatrix} 3/7 \\ 2/7 \\ 2/7 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W}_{11,12} = \begin{pmatrix} 0,4 \\ 0,6 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{W}_{13,14,15} = \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1/2 \\ 1/6 \end{pmatrix}.$$

Более подробно:  $w_6 = 0,6, w_7 = 0,4; w_8 = 3/7 \approx 0,43, w_9 = w_{10} = 2/7 \approx 0,29; w_{11} = 0,4, w_{12} = 0,6; w_{13} = 1/3 \approx 0,33, w_{14} = 1/2 = 0,5, w_{15} \approx 1/6 = 0,17$ .

На последнем уровне расширенного ролевого дерева находятся вершины, которые можно интерпретировать как роли с одним полномочием. Очевидно, что их относительные весовые коэффициенты  $w_{i,j}$  будут равны  $1/k$ , здесь  $k$  — количество вершин-полномочий, подчиненных одной

роли  $r_i, j$  — индекс полномочия  $p_j$ , для которого вычисляется вес. Отсюда получаем:

$$w_{6,1} = w_{6,2} = w_{6,3} = w_{8,3} = w_{8,4} = w_{8,5} = w_{12,1} = w_{12,4} = w_{12,5} = w_{14,1} = w_{14,2} = w_{14,5} = 1/3 \approx 0,33;$$

$$w_{7,2} = w_{7,4} = w_{9,3} = w_{9,5} = w_{10,2} = w_{10,4} = w_{11,2} = w_{11,5} = w_{13,3} = w_{13,5} = 1/2 = 0,5; w_{15,5} = 1.$$

Рассчитаем теперь комбинированные весовые коэффициенты или относительные вероятности (риски) утечки полномочий:

$$P(p_1) = w_{6,1}w_6w_2 + w_{12,1}w_{12}w_4 + w_{14,1}w_{14}w_5 \approx 0,33 \times 0,6 \times 0,25 + 0,33 \times 0,6 \times 0,25 + 0,33 \times 0,5 \times 0,25 \approx 0,14;$$

$$P(p_2) = w_{6,2}w_6w_2 + w_{7,2}w_7w_2 + w_{10,2}w_{10}w_3 + w_{11,2}w_{11}w_4 + w_{14,2}w_{14}w_5 \approx 0,33 \times 0,6 \times 0,25 + 0,5 \times 0,4 \times 0,25 + 0,5 \times 0,29 \times 0,25 + 0,5 \times 0,4 \times 0,25 + 0,33 \times 0,5 \times 0,25 \approx 0,23;$$

$$P(p_3) = w_{6,3}w_6w_2 + w_{8,3}w_8w_3 + w_{9,3}w_9w_3 + w_{13,3}w_{13}w_5 \approx 0,33 \times 0,6 \times 0,25 + 0,33 \times 0,43 \times 0,25 + 0,5 \times 0,29 \times 0,25 + 0,5 \times 0,33 \times 0,25 \approx 0,16;$$

$$P(p_4) = w_{7,4}w_7w_2 + w_{8,4}w_8w_3 + w_{10,4}w_{10}w_3 + w_{12,4}w_{12}w_4 \approx 0,5 \times 0,4 \times 0,25 + 0,33 \times 0,43 \times 0,25 + 0,5 \times 0,29 \times 0,25 + 0,33 \times 0,6 \times 0,25 \approx 0,17;$$

$$P(p_5) = w_{8,5}w_8w_3 + w_{9,5}w_9w_3 + w_{11,5}w_{11}w_4 + w_{12,5}w_{12}w_4 + w_{13,5}w_{13}w_5 + w_{14,5}w_{14}w_5 + w_{15,5}w_{15}w_5 \approx 0,33 \times 0,43 \times 0,25 + 0,5 \times 0,29 \times 0,25 + 0,5 \times 0,4 \times 0,25 + 0,33 \times 0,6 \times 0,25 + 0,5 \times 0,33 \times 0,25 + 0,33 \times 0,5 \times 0,25 + 1 \times 0,17 \times 0,25 \approx 0,30.$$

Как видим, максимальный риск утечки имеет полномочие  $p_5$ , что связано с его наибольшей распространенностью. Минимальный риск утечки — у полномочия  $p_1$ , что также согласуется с его наименьшей распространенностью в системе.

### Заключение

Из предложенной методики следует, что метод анализа иерархий дает возможность автоматизировать процесс ранжирования полномочий по величине риска их утечки. При этом решение принимается только на основе особенностей самой системы, без привлечения механизма экспертных оценок. Такое использование метода является новым, не применявшимся ранее. Действительно, в настоящее время метод анализа иерархий развивается в направлении использования теории нечетких множеств [16—18]. В рамках же построения комплексной системы

защиты информации метод и вовсе не получил должного развития и чаще всего используется в классической формулировке [19, 20], которая, как упоминалось выше, обладает рядом недостатков, не приемлемых для обеспечения требуемого уровня информационной безопасности.

Преимущество и новизна предлагаемого решения заключается именно в «связке» метода анализа иерархий и ролевого дерева системы разграничения доступа. Это, с одной стороны, дает возможность получить дополнительную информацию в ситуации, когда альтернативные решения нельзя связать какими-либо точными функциональными зависимостями, а с другой —

избавляет метод от несогласованности и субъективизма суждений экспертов.

Проведенная в статье оценка трудоемкости алгоритма позволяет говорить об отсутствии трудностей в программной реализации данного подхода и высоком быстродействии.

В заключение заметим, что в представленном методе ранжирование полномочий основано только на их распределении между ролями и на иерархии этих ролей. Сами по себе полномочия считаются равноценными. В общем случае полномочия могут отличаться друг от друга по своей важности, что следует учитывать при дальнейшем развитии предложенного подхода.

## Литература

1. **Гайдамакин Н. А.** Теоретические основы компьютерной безопасности: учеб. пособие. – Екатеринбург, 2008. – 212 с. <http://pv.bstu.ru/?topic=tokk> (дата обращения: 28.03.2013).
2. **Fuchs L., Pernul G., Sandhu R.** Roles in information security – A survey and classification of the research area // *Computers & Security*. Nov. 2011. Vol. 30. Iss. 8. P. 748–769.
3. **Armando A., Ranise S.** Scalable automated symbolic analysis of administrative role-based access control policies by SMT solving // *J. of Computer Security*. 2012. Vol. 20. N 4. P. 309–352.
4. **Salim F., Reid J., Dulleck U., Dawson E.** Budget-aware Role Based Access Control // *Computers & Security*. June 2013. Vol. 35. P. 37–50.
5. **Колегов Д. Н.** Построение иерархического ролевого управления доступом // *Прикладная дискретная математика*. 2012. № 3(17). С. 70–76.
6. **Гайдамакин Н. А.** Разграничение доступа к информации в компьютерных системах / Урал. ун-т. – Екатеринбург, 2003. – 328 с.
7. **Колегов Д. Н.** Применение ДП-моделей для анализа защищенности сетей // *Прикладная дискретная математика*. 2008. № 1(1). С. 71–87.
8. **Мальцев Г. Н., Теличко В. В.** Оптимизация состава средств защиты информации в информационно-управляющей системе с каналами беспроводного доступа на основе графа реализации угроз // *Информационно-управляющие системы*. 2008. № 4(35). С. 29–33.
9. **Phillips C., Swiler L. P.** A Graph-Based System for Network-Vulnerability Analysis // *Proc. of the New Security Paradigms Workshop*. Charlottesville, VA, USA. 1998. P. 71–79.
10. **Noel S., Jajodia S., Wang L., Singhal A.** Measuring Security Risk of Networks Using Attack Graphs // *Intern. J. of Next-Generation Computing*. July 2010. Vol. 1. N 1. P. 135–146.
11. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
12. **Таха Х. А.** Теория игр и принятия решений // *Введение в исследование операций*. 7-е изд. – М.: Вильямс, 2007. Гл. 14. С. 549–594.
13. **Белим С. В., Богаченко Н. Ф.** Построение ролевой политики безопасности на произвольном ориентированном графе // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2009. № 3. С. 7–17.
14. **Ногин В. Д.** Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2004. Т. 44. № 7. С. 1259–1268.
15. **Новиков Ф. А.** Дискретная математика для программистов. – СПб.: Питер, 2000. – 304 с.
16. **Sun C.-C.** A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods // *Expert Systems with Applications*. Dec. 2010. Vol. 37. Iss. 12. P. 7745–7754.
17. **Садов С. Л.** Долгосрочный прогноз экономических результатов: инструментальный потенциал теории нечетких множеств // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2012. № 6(24). С. 192–196.
18. **Каган Е. С.** Применение метода анализа иерархий и теории нечетких множеств для оценки сложных социально-экономических явлений // *Известия Алтайского государственного университета*. 2012. № 1(73). Т. 1. С. 160–163.
19. **Молдованин Т. В.** Решение задачи выбора оптимального варианта комплексной защиты информации с помощью метода экспертного оценивания // *Информационно-управляющие системы*. 2007. № 3(28). С. 39–44.
20. **Кутузов Д. В., Белозеров В. Н., Ларченко Р. О.** Методы оценки рисков, связанных с нарушением информационной безопасности предприятия // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2010. № 1(9). С. 19–24.

УДК 681.3

## СПОСОБЫ ОТРИЦАЕМОГО ШИФРОВАНИЯ С РАЗДЕЛЯЕМЫМ КЛЮЧОМ

**Е. В. Морозова,**

канд. техн. наук, ученый секретарь НТС

НИИ «Вектор», г. Санкт-Петербург

**Я. А. Мондикова,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Н. А. Молдовян,**

доктор техн. наук, заведующий лабораторией

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Предложены критерии построения алгоритмов отрицаемого шифрования для реализации механизмов защиты информации типа обманных ловушек и представлены разработанные алгоритмы данного типа. Новыми реализованными требованиями являются неотличимость от вероятностного шифрования и идентичность процедуры расшифрования и использования всех битов криптограммы для всех возможных значений ключа. Предложенные способы отрицаемого шифрования обеспечивают высокую производительность и перспективны для расширения арсенала криптографических механизмов защиты информации, используемых в комплексных системах компьютерной безопасности.

**Ключевые слова** — компьютерная безопасность, криптография, отрицаемое шифрование, хэш-функции, блочные шифры, вероятностное шифрование, криптограмма.

### Введение

Понятие отрицаемого шифрования (ОШ) [1] связывается с задачей обеспечения стойкости шифрования информации в условиях возможности так называемых атак с принуждением. Данные виды атак подразумевают наличие у атакующего таких ресурсов воздействия на отправителя и (или) получателя сообщений, которые вынуждают отправителя и (или) получателя раскрыть параметры процесса зашифрования (принуждающая атака на отправителя сообщения) или расшифрования (принуждающая атака на получателя сообщения), например, ключ шифрования и случайные значения, использованные в процессе шифрования. Если предполагается, что атакующий может потребовать предоставления ему параметров как зашифрования, так и расшифрования, то имеет место двухсторонняя принуждающая атака. Стойкость к таким атакам обеспечивается алгоритмами и протоколами ОШ тем, что выходной шифртекст (криптограмма) может быть получен из различных осмысленных исходных сообщений и (или) из криптограммы могут

быть получены различные расшифрованные осмысленные тексты. Атакующему передаются параметры шифрования, которые связывают криптограмму с некоторым фиктивным осмысленным текстом. Атакующий проверяет то, что использование предоставленных ему параметров шифрования действительно приводит к преобразованию фиктивного сообщения в заданную криптограмму и (или) к расшифрованию последней в фиктивное сообщение. Если результат проверки является положительным и атакующий не может доказать неполноту раскрытого текста, то алгоритм (протокол) ОШ считается стойким.

В известной литературе основное внимание исследователей направлено на способы ОШ, относящиеся к криптосхемам с открытым ключом. Такие способы основаны на использовании алгоритмов открытого шифрования или протоколов открытого распределения ключей [2—4]. При этом предполагается, что отправитель и получатель не имеют общей секретной информации (разделяемого секретного ключа), а восстановление фиктивного/настоящего сообщения зависит от применяемых случайных значений.

Интерес к алгоритмам и протоколам ОШ связан с перспективами их применения в защищенных распределенных вычислениях и системах тайного электронного голосования [5, 6]. Одно из ограничений практического использования процедур ОШ состоит в их низкой производительности, особенно характерной для криптосхем с открытым ключом. Поиск новых алгоритмов и протоколов ОШ привел к разработке более производительных способов ОШ [7, 8], однако практика требует дальнейшего повышения скорости работы криптоалгоритмов, особенно в случаях применения способов ОШ как специального механизма защиты информации в комплексных средствах компьютерной безопасности, основанного на обманных ловушках [9].

В отличие от схем ОШ на основе асимметричных алгоритмов шифрования, ОШ, основанное на схемах с разделяемым ключом, подразумевает наличие общего секрета (общего секретного ключа), позволяющего восстановить настоящее сообщение, как у отправителя, так и у получателя. В данной работе решается задача разработки производительных алгоритмов отрицательного шифрования при одновременном обеспечении высокой стойкости к двухсторонней атаке с принуждением на основе ОШ с разделяемым секретом. Сочетание производительности и стойкости снимает существенные ограничения к практическому применению алгоритмов ОШ для защиты информации в средствах обеспечения информационной безопасности. При этом формулируются специальные требования к алгоритмам ОШ, связанные с использованием ОШ для реализации механизмов защиты типа обманных ловушек. Предложенные новые требования не удовлетворяются известными в литературе алгоритмами ОШ с разделяемым секретом [1].

### **Требования к алгоритмам отрицательного шифрования с разделяемым секретом**

Реализация механизмов защиты информации типа обманных ловушек основана на использовании способов ОШ, обеспечивающих возможность достаточно быстрого совместного зашифрования двух или более различных сообщений на двух или более различных ключах конечной длины. Одно из сообщений является фиктивным и зашифровывается на фиктивном секретном ключе, к которому организуется контролируемый доступ со стороны нарушителя. При расшифровании соответствующим образом составленного фиктивного сообщения нарушитель оказывается введенным в заблуждение (дезинформированным). Однако следует

предполагать, что нарушитель знает алгоритм расшифрования, используемый санкционированным пользователем, и может проанализировать криптограмму и ее применение при выполнении процедуры расшифрования по фиктивному ключу. Это не должно дать ему обоснованных подозрений, что кроме полученного им фиктивного ключа имеется еще и другой ключ, расшифровывающий криптограмму в другое осмысленное сообщение. Другими словами, алгоритм ОШ должен обладать такими свойствами, которые не позволят атакующему отличить ОШ от вероятностного шифрования по криптограмме, по фиктивному сообщению и фиктивному ключу. Это определяет следующие требования к алгоритмам ОШ:

- 1) неотличимость по криптограмме от вероятностного шифрования;
- 2) одинаковость процедур расшифрования для различных используемых ключей;
- 3) равноправность (идентичность использования) всех битов криптограммы для всех возможных значений ключа расшифрования.

Эти требования накладываются на требование использовать ключи конечного размера и обеспечивать достаточно высокую производительность. Они фактически являются продолжением принципа Керкхоффа, сформулированного для симметричных алгоритмов шифрования: шифр должен быть стойким при условии, что все детали процедуры шифрования известны атакующему. Для алгоритмов ОШ этот принцип разумно дополнить требованиями вычислительной неотличимости от вероятностного алгоритма шифрования при известной процедуре расшифрования и известной криптограмме. Смысл этого расширения принципа Керкхоффа состоит в том, чтобы атакующий не смог обоснованно утверждать (подозревать), что в криптограмме содержится какое-то другое сообщение, кроме сообщения, полученного с помощью имеющегося у него ключа расшифрования. Из трех сформулированных ранее требований к алгоритмам ОШ второе и третье являются вспомогательными. Однако несоблюдение этих требований служит источником предположений о том, что кроме фиктивного сообщения криптограмма содержит и другую информацию. Сформулированные требования выполняются, если можно указать алгоритм вероятностного шифрования, который преобразует фиктивное сообщение по фиктивному ключу в криптограмму, полученную с помощью алгоритма ОШ. При этом алгоритм расшифрования задается некоторой математической формулой, в которую криптограмма и ключ расшифрования входят в качестве параметров преобразования.

### Способ отрицаемого шифрования с использованием блочных преобразований

Пусть дана хэш-функция  $F_H$ . Шифрование сообщения  $T$ , представленного в виде последовательности  $u$ -битовых знаков  $\{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_z\}$ , выполним путем подбора  $k$ -битовых значений  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_z\}$ , где  $k > u$ , таких, что выполняется соотношение

$$F_H(K, r_i) \bmod 2^u = t_i \quad (1)$$

или

$$F_H(K, i, r_i) \bmod 2^u = t_i, \quad (2)$$

где  $K$  — ключ шифрования, для всех значений  $i = 1, 2, \dots, z$ . На каждом шаге зашифрования значения  $r_i$  выбираются по случайному закону, т. е. эта процедура является вероятностной. Заданному исходному тексту соответствует большое число различных криптограмм. Расшифрование каждой возможной криптограммы приводит к получению одного и того же исходного текста. Расшифрование криптограммы выполняется как последовательная подстановка знаков криптограммы  $R$  в формулу (1) или (2).

Очевидно, что размер значений  $r_i$  должен превышать размер значений  $t_i$ . В результате последнего размер криптограммы больше размера исходного сообщения. Данный способ вероятностного шифрования является интересным благодаря следующим особенностям:

- универсальность (любая хэш-функция или блочное преобразование может быть использовано для реализации вероятностного шифрования по этому способу);

- полное совпадение формул зашифрования и расшифрования;

- возможность выполнения одновременного зашифрования двух и более сообщений.

Смысл шифрования по формуле (2) состоит в том, что включение счетчика в аргумент хэш-функции приводит к получению хороших статистических свойств шифртекста (криптограммы) даже при сравнительно малых значениях  $k$  и  $u$ . Например, можно использовать значения  $k = 16$  и  $u = 4$  при шифровании по формуле (2), тогда как при шифровании по формуле (1) достаточная стойкость достигается при  $k \geq 24$  и  $u \geq 8$ .

Шифрование двух сообщений  $T$  и  $M$ , представленного в виде последовательности знаков  $\{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_z\}$ , выполним путем подбора  $k$ -битовых значений  $\{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_z\}$  знаков так, что выполняется пара соотношений

$$F_H(K_1, r_i) \bmod 2^u = t_i \text{ и } F_H(K_2, r_i) \bmod 2^u = m_i$$

или

$$F_H(K_1, i, r_i) \bmod 2^u = t_i \text{ и } F_H(K_2, i, r_i) \bmod 2^u = m_i.$$

Очевидно, что размер значений  $r_i$  должен превышать сумму разрядностей значений  $t_i$  и  $m_i$ . Причем это должно обеспечить достаточно малое значение вероятности того, что для данной пары значений  $t_i$  и  $m_i$  не будет найдено подходящее значение  $r_i$ . Например, можно задать значения  $k = 32$  и  $u = 8$ .

Вместо хэш-функции  $F_H$  можно использовать алгоритм блочного шифрования  $E_K$ . Тогда шифрование пары сообщений  $T$  и  $M$  выполняется по формулам

$$E_{K_1}(r_i) \bmod 2^u = t_i \text{ и } E_{K_2}(r_i) \bmod 2^u = m_i$$

или

$$E_{K_1}(i, r_i) \bmod 2^u = t_i \text{ и } E_{K_2}(i, r_i) \bmod 2^u = m_i.$$

Включение счетчика в аргумент в случае использования алгоритмов блочного шифрования также обосновывается улучшением статистических свойств ОШ. Преимуществом использования блочных шифров по сравнению с использованием хэш-функций состоит в том, что выходное значение имеет меньшую длину, благодаря чему может быть достигнута более высокая производительность алгоритма ОШ. Представляет интерес использование 64-битовых блочных шифров, а также специально разработанных хэш-функций с  $u$ -битовым выходным значением.

Описанный выше способ вероятностного шифрования может обеспечить скорость преобразования входного сообщения, равную  $1 - 10^3$  Мбит/с, а построенный на его основе алгоритм ОШ — скорость зашифрования, равную  $10 - 10^4$  Кбит/с (в режиме расшифрования производительность равна производительности алгоритма вероятностного шифрования). В ряде практических случаев применения ОШ для защиты информации такой производительности достаточно, однако расширение областей применения ОШ связано с существенным повышением скорости совместного шифрования двух сообщений. В следующем разделе предлагается вариант решения данной задачи.

### Способ скоростного отрицаемого шифрования

Совместное шифрование двух различных осмысленных сообщений по ключам  $(K_1, m_1)$  и  $(K_2, m_2)$ , где  $K_1$  и  $K_2$  — ключи некоторого блочного шифра  $E$  с  $v$ -битовым входом;  $m_1$  и  $m_2$  — взаимно простые числа, можно выполнить, разбив их на блоки данных размером  $v$  бит и последовательно преобразуя пары блоков данных следующим путем.

1. Используя алгоритм блочного шифрования  $E$  и ключ  $K_1$ , зашифровать блок  $M$  первого сообщения:  $C_M = E_{K_1}(M)$ .

2. Используя блочный шифр  $E$ , зашифровать блок  $T$  второго сообщения по ключу  $K_2$ :  $C_T = E_{K_2}(T)$ .

3. Используя дополнительные секретные значения  $m_1$  и  $m_2$ , которые являются взаимно простыми, вычислить блок криптограммы, содержащий информацию об обоих исходных текстах  $T$  и  $M$  и являющийся решением следующей системы сравнений:

$$\begin{cases} C \equiv C_M \pmod{m_1} \\ C \equiv C_T \pmod{m_2} \end{cases}, \quad (3)$$

где выходные блоки  $C_T$  и  $C_M$  функции шифрования  $E$  интерпретируются двоичными числами;  $m_1$  и  $m_2$  — секретные взаимно простые значения, имеющие разрядность  $v+1$  бит. Размер выходного шифртекста  $C$  на два бита больше суммы размеров шифртекстов  $C_T$  и  $C_M$ . Для чисел  $m_1$  и  $m_2$  может быть задано и большее значение разрядности, например  $v+\delta$ , однако это приведет к увеличению размера криптограммы на  $2(\delta-1)$  бит по сравнению с рассматриваемым случаем. Решение системы линейных сравнений (3) описывается формулой

$$C = [C_M m_2 (m_2^{-1} \pmod{m_1}) + C_T m_1 (m_1^{-1} \pmod{m_2})] \pmod{m_1 m_2}.$$

Вычисление значений  $m_2(m_2^{-1} \pmod{m_1})$  и  $m_1(m_1^{-1} \pmod{m_2})$  может быть выполнено на этапе генерации секретных ключей, поэтому основной вклад в трудоемкость вычисления значения  $C$  вносит операция деления значения в квадратных скобках на модуль  $m_1 m_2$ . При использовании скоростных блочных шифров данный способ ОШ обеспечивает высокую производительность (в  $10^2-10^3$  раз более высокую по сравнению со способом ОШ, описанным в предыдущем разделе). Другим его достоинством является то, что размер криптограммы существенно меньше по сравнению с вышеописанным способом ОШ.

Для практического использования алгоритмов ОШ в системах компьютерной безопасности, предусматривающих реализацию защиты информации в режиме прозрачного шифрования данных на встроенном носителе информации [10], предпочтительным является случай равенства размера шифртекста  $C$  сумме размеров шифртекстов  $C_T$  и  $C_M$ . Для реализации такого требования при одновременном получении более высокого быстродействия может быть применен способ ОШ, аналогичный рассмотренному, но отличающийся тем, что формирование блока криптограммы осуществляется путем решения следу-

ющей системы линейных сравнений, в которых модулями являются многочлены:

$$\begin{cases} C \equiv E_{K_1}(M) \pmod{\mu(x)} \\ C \equiv E_{K_2}(T) \pmod{\lambda(x)} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\mu(x)$  и  $\lambda(x)$  — взаимно простые двоичные многочлены степени  $v$ ; выходные значения блочного алгоритма шифрования интерпретируются двоичными многочленами степени  $v-1$ . При формировании криптограммы  $C$  выполняются вычисления в конечных кольцах двоичных многочленов. Решение этой системы сравнений представляет собой двоичный многочлен степени  $2v-1$ , который вычисляется по формуле

$$C = [E_{K_1}(M) \cdot \lambda(x) (\lambda^{-1}(x) \pmod{\mu(x)}) + E_{K_2}(T) \cdot \mu(x) (\mu^{-1}(x) \pmod{\lambda(x)})] \pmod{\mu(x)\lambda(x)}.$$

Так же как и для предыдущего способа ОШ, вычисление значений  $\lambda^{-1}(x) \pmod{\mu(x)}$  и  $\mu^{-1}(x) \pmod{\lambda(x)}$  может быть выполнено заранее, чтобы ускорить процесс шифрования. Для увеличения производительности алгоритма шифрования можно выбрать двоичные трехчлены (не обязательно, чтобы многочлены были неприводимы). Значение  $k$  может выбираться равным 64, 128, 256, 512 бит и более. При этом могут использоваться как известные блочные шифры, так и разрабатываемые специально для реализации данного способа ОШ. Алгоритмы ОШ, описанные в настоящем разделе, относятся к алгоритмам блочного шифрования. При шифровании с их помощью сообщений произвольной длины последние должны быть разбиты на блоки, которые могут шифроваться в режиме электронной кодовой книги, в режиме сцепления блоков шифра или в других известных и применяемых для блочных шифров режимах [11–13], которые должны быть соответствующим образом адаптированы для случая ОШ.

### Соответствие предложенным требованиям

Способ ОШ, основанный на использовании хэш-функций или блочных преобразований и описанный в разделе «Способ отрицаемого шифрования с использованием блочных преобразований», обеспечивает выполнение трех требований к алгоритмам ОШ, сформулированным в разделе «Требования к алгоритмам отрицаемого шифрования с разделяемым секретом». Это непосредственно видно из описания алгоритмов, реализованных на основе этого способа.

Алгоритмы ОШ, описанные в предыдущем разделе, с очевидностью удовлетворяют второ-

му и третьему требованиям. Покажем, что они удовлетворяют также и требованию неотличимости от вероятностного шифрования. Для этого укажем алгоритм вероятностного шифрования, который по фиктивному ключу преобразует фиктивное сообщение в криптограмму. Данный алгоритм будем называть ассоциируемым алгоритмом вероятностного шифрования.

Рассмотрим алгоритм ОШ, включающий решение системы сравнений (3). Пусть фиктивным ключом является пара значений  $(K_2, m_2)$ , а фиктивным сообщением —  $T$ . Ассоциируемый алгоритм вероятностного шифрования описывается следующим образом.

1. Зашифровывается сообщение  $T$  с использованием блочного алгоритма шифрования по формуле  $C' = E_{K_2}(T)$ .

2. Генерируется случайное значение  $R < 2^v$  и простое случайное значение  $2^v < r < 2^{v+1}$ .

3. Вычисляется криптограмма  $C$  как решение следующей системы сравнений:

$$\begin{cases} C \equiv C' \pmod{m_2} \\ C \equiv R \pmod{r} \end{cases} \quad (5)$$

Заданная криптограмма  $C$  может быть получена с помощью ассоциированного алгоритма вероятностного шифрования при различных парах значений  $R < 2^v$  и  $r < 2^{v+1}$ . Выберем произвольное простое число  $2^v < r < 2^{v+1}$ . По формуле  $C \equiv R \pmod{r}$  вычислим значение  $R$ , которое вместе с выбранным  $r$  образует пару значений, при которых решение системы (5) совпадает с заданной криптограммой  $C$ . Это означает, что заданная криптограмма может быть получена при выполнении шифрования фиктивного сообщения  $T$  с использованием процедуры вероятностного шифрования по фиктивному ключу  $(K_2, m_2)$ . Для доказательства того, что криптограмма была получена с использованием алгоритма ОШ, атакующему требуется вычислить ключ  $(K_1, m_1)$  и расшифровать сообщение  $M$ . Однако даже при известном фиктивном ключе и известном фиктивном сообщении это является не проще взлома алгоритма блочного шифрования  $E$ . Действительно, если известно секретное значение  $m_1$ , то тогда можно вычислить шифртекст, формируемый на выходе функции блочного шифрования  $E$  при шифровании сообщения  $M$  по ключу  $K_1$ , т. е. в результате этого получаем стандартные условия, при которых блочные шифры должны быть стойкими.

## Заключение

В настоящей статье рассмотрено применение алгоритмов ОШ с разделяемым секретным ключом в качестве механизма защиты информации и

сформулированы требования к алгоритмам такого типа, ориентированные на применение в механизмах защиты, позволяющих реализовать обманные ловушки. Данный механизм защиты информации является новым для применения в комплексных системах информационной и компьютерной безопасности. Описаны разработанные способы и конкретные алгоритмы ОШ, удовлетворяющие сформулированным требованиям. Одним из сформулированных требований является неотличимость криптограммы, полученной с помощью процедуры ОШ, от криптограммы, полученной с помощью процедуры вероятностного шифрования. Соответствие разработанных алгоритмов этому требованию обосновывается указанием ассоциированного вероятностного шифра, для которого процедура расшифрования совпадает с процедурой расшифрования фиктивного сообщения по фиктивному ключу. Приведенные ассоциированные вероятностные шифры интересны тем, что в процессе расшифрования криптограммы случайные значения, использованные при выполнении процедуры зашифрования, не восстанавливаются однозначно, тогда как для известных вероятностных блочных шифров в процессе расшифрования использованные случайные значения восстанавливаются однозначно [10, 14]. Это определяет самостоятельный интерес к рассмотренным алгоритмам вероятностного шифрования. Также самостоятельной исследовательской задачей является разработка достаточно быстрых алгоритмов ОШ, обладающих коммутативными свойствами. Наши предварительные результаты свидетельствуют в пользу возможности решения последней задачи с использованием механизма формирования криптограммы на основе решения системы сравнений, предложенного в данной работе. Рассмотренные алгоритмы относятся к случаю одновременного шифрования двух сообщений, однако они легко расширяются на случай одновременного шифрования трех и более сообщений.

## Литература

1. Canetti R., Dwork C., Naor M., Ostrovsky R. Deniable Encryption // Advances in Cryptology – CRYPTO 1997: Proc. P. 90–104.
2. Ibrahim M. H. A Method for Obtaining Deniable Public-Key Encryption // Intern. J. of Network security. 2009. Vol. 8. N 1. P. 1–9.
3. Ibrahim M. H. Receiver-Deniable Public-Key Encryption // Intern. J. of Network security. 2009. Vol. 8. N 2. P. 159–165.
4. Klonowski M., Kubiak P., Kutylowski M. Practical Deniable Encryption // Theory and Practice of Com-

- puter Science: 34th Conf. on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science SOFSEM 2008, Nový Smokovec, Slovakia, Jan. 19–25, 2008. P. 599–609.
5. **Canetti R., Gennaro R.** Incoercible multiparty computation // Proc. of the 37th Annual Symp. on Foundations of Computer Science FOCS, Oct. 14–16, 1996 // IEEE Computer Society, Washington, DC. P. 504.
  6. **Bo Meng.** A Secure Internet Voting Protocol Based on Noninteractive Deniable Authentication Protocol and Proof Protocol that Two Ciphertexts are Encryption of the Same Plaintext // J. of Networks. 2009. Vol. 4. N 5. P. 370–377.
  7. **Bresson E., Catalano D., Pointcheval D.** A simple public key cryptosystem with a double trapdoor decryption mechanism and its applications // Proc. of the Aciacrypt 2003 Conf. LNCS 2894. Berlin: Springer-Verlag, 2003. P. 37–54.
  8. **Bo Meng, Jiang Qing Wang.** A Receiver Deniable Encryption Scheme // Proc. of the 2009 Intern. Symp. on Information Processing (ISIP'09), Huangshan, P. R. China, Aug. 21–23, 2009. P. 254–257.
  9. **Березин А. Н., Биричевский А. Р., Молдовян Н. А., Рыжков А. В.** Способ отрицаемого шифрования // Вопросы защиты информации. 2013. № 2. С. 18–21.
  10. **Алексеев Л. Е., Молдовян А. А., Молдовян Н. А.** Алгоритмы защиты информации в СЗИ НСД «СПЕКТР-Z» // Вопросы защиты информации. 2000. № 3. С. 63–68.
  11. **Pieprzyk J., Hardjono Th., Seberry J.** Fundamentals of Computer Security. – Berlin: Springer-Verlag, 2003. – 677 p.
  12. **Смарт Н.** Криптография. – М.: Техносфера, 2005. – 528 с.
  13. **Menezes A. J., Vanstone S. A.** Handbook of Applied Cryptography. – CRC Press, 1996. – 780 p.
  14. **Молдовян А. А., Молдовян Н. А., Гуц Н. Д., Изотов Б. В.** Криптография: скоростные шифры. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 495 с.

#### Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2013 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2013 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4200 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4800 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: [Alfimov@viniti.ru](mailto:Alfimov@viniti.ru), сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: [interpochta@interpochta.ru](mailto:interpochta@interpochta.ru), сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: [krasnodar@interpochta.ru](mailto:krasnodar@interpochta.ru)

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru), сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru), сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

УДК 004.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРЕЗА ПРИ СИМУЛЯЦИОННОМ ОБУЧЕНИИ БАЗОВЫМ НАВЫКАМ ЛАПАРОТОМИИ

**А. В. Колсанов,**

доктор мед. наук, профессор

**Р. Р. Юнусов,**

канд. мед. наук, доцент

Самарский государственный медицинский университет

**А. В. Иващенко,**

доктор техн. наук, доцент

**А. В. Кузьмин,**

канд. техн. наук, доцент

**А. Е. Голованов,**

ведущий инженер

**А. С. Черепанов,**

ведущий инженер

**Д. Ю. Зайцев,**

ведущий инженер-конструктор

ООО НПК «Маджента Девелопмент», г. Самара

Описывается тренажер открытой хирургии, входящий в аппаратно-программный комплекс «Виртуальный хирург». Тренажер разработан с использованием современных технологий трехмерного моделирования и компьютерной графики и предназначен для моделирования оперативного вмешательства при системном обучении врачей-хирургов методикам лапаротомии (разрезам брюшной стенки) с небольшим размером операционного поля на этапах додипломного и последипломного образования. Наибольшее внимание уделяется алгоритмам имитации разреза трехмерных объектов, представленных объемными примитивами.

**Ключевые слова** — трехмерное моделирование, хирургия, симуляционное обучение, разрез, тесселяция, геометрическая модель, *ogre3d*, *physX*.

### Введение

Современное развитие информационных технологий и робототехники позволяет создать мощные средства дополненной виртуальной реальности, моделирующие реальные процессы и явления и позволяющие реализовать передовые методики обучения. Одним из актуальных направлений в этой области является разработка и внедрение в учебный процесс симуляционных технологий, например тренажеров, для подготовки врачей-хирургов с различной специализацией [1, 2]. Это направление, известное как симуляционное обучение в медицине [3], — вид учебной деятельности, направленный на освоение обучающимися всех категорий практических навыков, комплексных умений и отработку командных действий в процессе оказания меди-

цинской помощи. В его основе лежит использование симуляционных моделей: роботов-симуляторов пациента, виртуальных тренажеров, муляжей, фантомов и манекенов.

В последнее время среди прочих моделей применяются тренажеры для обучения навыкам открытой хирургии [4, 5]. Значимость таких тренажеров обусловлена тем, что открытые операции, во-первых, широко применяются на практике и, во-вторых, связаны с достаточно высоким уровнем травматичности и повреждения тканей и органов. От точных и выверенных действий хирурга во многом зависят последствия операции с возможными осложнениями и процесс послеоперационного восстановления. Существующие тренажеры воспроизводят условия операции с разной степенью реалистичности, однако комплексного решения, которое обеспечило бы высокую

реалистичность обратной связи и трехмерного изображения, готового к внедрению в медицинских организациях, пока нет.

При проведении открытых операций хирург получает визуальную информацию о состоянии внутренностей через открытый разрез, а тактильные ощущения — посредством взаимодействия с хирургическими инструментами. Современные технологии трехмерного моделирования и мехатроники позволяют добиться высокой реалистичности как изображений, так и обратной связи, что определяет широкие перспективы использования таких тренажеров в учебном процессе.

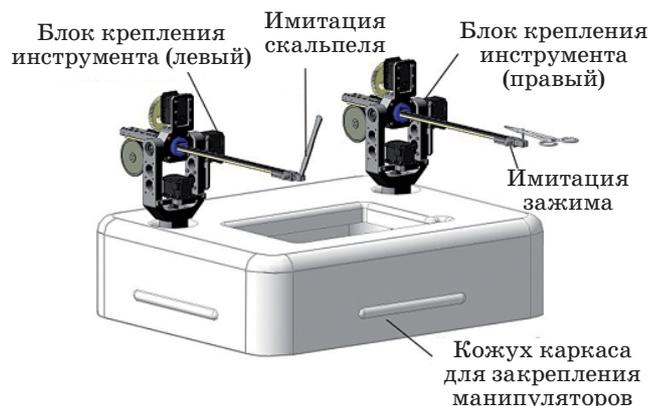
В данной статье описывается аппаратно-программное решение для симуляционного обучения базовым навыкам лапаротомии. Лапаротомия — это маневр открытой хирургии, заключающийся в разрезе брюшной стенки для получения доступа к органам брюшной полости. Описываемое решение разработано с использованием манипуляторов, позволяющих симулировать движения инструментов с обратной связью. Данные манипуляторы универсальны и показали хорошие результаты в тренажере эндоскопии [6]. Адаптация их для моделирования открытой операции потребовала разработки новых алгоритмов имитации разреза, анализу которых посвящена данная работа.

### Описание тренажера открытой хирургии

Аппаратно-программный комплекс «Виртуальный хирург» был разработан для 3D-моделирования операционного процесса и системного обучения врача-хирурга методикам открытой хирургии с небольшим размером операционного поля, методикам эндоваскулярной хирургии и эндоскопической хирургии на этапах додипломного и последипломного образования.

Если для тренажеров эндоваскулярной и лапароскопической хирургии существуют различные решения, то аналогичные тренажеры лапаротомии или открытой хирургии отсутствуют, что определяет новизну и высокую практическую значимость данной работы.

Разработанный комплекс универсален, может применяться для отработки базовых навыков и освоения методик проведения операций, включая тактику при возможных осложнениях. Наличие общей программной составляющей, разнообразных манипуляторов и средств визуализации позволяет использовать комплекс для освоения различных методик открытой хирургии. Существующие алгоритмы оценки качества в составе учебно-методических модулей комплекса обеспечивают объективную оценку результатов тренировок.



■ Рис. 1. Тренажер открытой хирургии

Внешний вид тренажера открытой хирургии в составе АПК «Виртуальный хирург» представлен на рис. 1.

Программное обеспечение комплекса реализовано с использованием современных технологий для построения 3D-сред и физических свойств материалов: USB HID, DirectInput, SDL, OpenGL, Direct3D, OpenCL, DirectCompute, CUDA, PhysX, Havok. В частности, разработан специализированный модуль, который обеспечивает имитационное моделирование физического взаимодействия в рамках операционного поля, включая обнаружение и обработку столкновений мягких тел, т. е. факта взаимодействия объектов операционного поля между собой, определение изменений в положении (перемещения) и в геометрии (деформацию) объектов операционного поля, определение изменений топологии объектов операционного поля (нарушение целостности), обработку дискретных событий, изменяющих физическую модель операционного поля (клипирование, отрезание, коагуляцию, смену инструмента и т. д.), регистрацию событий взаимодействия инструментов с объектами операционного поля с требуемой детализацией и расчет положений и сил при взаимодействии инструментов с объектами операционного поля.

### Постановка задачи моделирования разреза при верхнесрединной лапаротомии

Одной из основных задач обеспечения открытой хирургии является правильная алгоритмизация взаимодействия виртуальных инструментов и тканей на операционном поле. Рассмотрим задачу трехмерного моделирования взаимодействия инструментов и мягких тканей при симуляции верхнесрединной лапаротомии. При проведении этого вида вмешательства, т. е. при разрезе по средней линии выше пупка, рассекают

кожу, подкожную клетчатку, апоневроз (или белую линию живота), предбрюшинную клетчатку и брюшину. Этот разрез обеспечивает доступ к органам верхнего этажа брюшной полости.

Объекты в сценах открытой хирургии описываются двумя видами примитивов:

— треугольниками, принадлежащими поверхности, ограничивающей внутренний объем объекта (поверхностная модель);

— тетраэдрами, заполняющими внутренний объем объекта (объемная модель).

Таким образом, информация об объекте, представленном как поверхностной, так и объемной своей моделью, включает два массива:

— массив координат вершин примитивов (порядковый номер вершины и ее координаты в трехмерном пространстве  $(x, y, z)$ );

— массив примитивов, каждый элемент которого включает порядковый номер треугольника и три индекса, определяющих порядковые номера вершин, принадлежащих данному треугольнику, или четыре индекса, определяющих порядковые номера вершин, принадлежащих данному тетраэдру.

При этом важнейшим аспектом является реалистичное моделирование разреза тканей инструментом. С технической точки зрения разрез сложен тем, что нарушает топологические свойства объекта, связан с перестроением данных, описывающих этот объект.

Операция разреза обладает существенными особенностями, предъявляющими требования к реализации конкретных алгоритмов:

— необходимость выполнения в реальном масштабе времени, так как неизвестно заранее, какой именно разрез (его длина, глубина, направление и скорость) будет произведен; в таком случае стратегия предварительных расчетов и сохранение предварительно обработанных данных для их использования по запросу в требуемый момент оказывается неприменимой;

— сохранение непротиворечивости и логической целостности структуры данных, описывающей трехмерный объект. Как уже отмечалось, объект при разрезе меняет свои топологические свойства, при этом для стабильной работы должны сохраняться требования используемых структур данных (нарушение этого требования, т. е., например, появление «лишних» опорных точек поверхности, которые не принадлежат ни одному треугольнику поверхности, ведет к ошибкам при визуализации);

— инвариантность алгоритма для объектов, описанных различными примитивами. Так как различные учебные задания могут включать объекты, составленные как поверхностными, так и объемными примитивами, то необходимо, чтобы

алгоритм разреза в целом позволял работать и с первым, и со вторым видом объектов, возможно, с некоторыми деталями реализации.

Задачи построения сечения решаются с помощью различных алгоритмов, которые зависят от конкретных условий применения, используемых примитивов и типов объектов, например, для поверхностных моделей объектов. Укрупненный и обобщенный алгоритм построения сечения включает следующие этапы:

— определение области разреза (т. е. той области объекта, которая непосредственно взаимодействует с инструментом, на следующем шаге она будет перестроена и разрез будет виден);

— разделение примитивов, попавших в область разреза, так, чтобы края разреза были корректно описаны, а в результате был сформирован корректный набор данных, описывающих объект с разрезом (включает перестроение данных объекта, удаление и добавление вершин и примитивов);

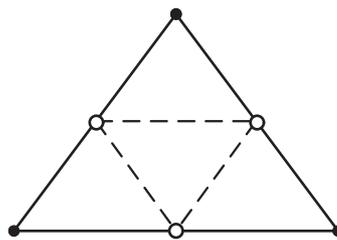
— раздвижение разделенных примитивов в разные стороны.

В ходе выполнения работы для решения поставленной задачи было предложено два универсальных алгоритма разреза трехмерных объектов операционного поля — регулярной тесселяции и разделения по плоскости.

### Алгоритм регулярной тесселяции

Алгоритм регулярной тесселяции основан на разбиении треугольников, принадлежащих поверхностям операционного поля, путем заполнения двумерного пространства в результате многократного повторения определенного геометрического примитива [7].

Для упрощения описания рассмотрим принцип работы алгоритма для случая разреза поверхностной модели, включающей набор треугольников поверхности. Процесс тесселяции (рис. 2) заключается в добавлении трех новых точек, каждая из которых находится в середине ребра треугольника, и соединении этих точек тремя дополнительными ребрами, т. е. из одно-



■ Рис. 2. Тесселяция треугольника

го исходного треугольника (3 вершины, 3 ребра) получаются четыре результирующих (6 вершин, 9 ребер).

Данный процесс повторяется итеративно, причем на каждом следующем этапе тесселяции подвергаются только требуемые треугольники. В результате получается структура рекурсивного разделения поверхности объекта. Подобные же структуры, имеющие фрактальную природу, используются и для описания различных объемных объектов [8].

Режущая часть используемого в тренажере хирургического инструмента практически всегда имеет плоскую или близкую к плоской форму, поэтому представляется треугольником или четырехугольником.

На первом этапе производится анализ наличия пересечений всех примитивов объекта (треугольников). Для этого находятся пересечения ребер треугольника секущего инструмента и плоскостей треугольников поверхности и наоборот (такой двухпроходный анализ позволяет избежать ошибок в некоторых случаях особого взаимного расположения инструмента и поверхности). Те примитивы, которые обнаруживают взаимодействие с секущим треугольником, относятся к области разреза.

На втором этапе все примитивы области разреза подвергаются тесселяции в зависимости от заранее установленного числа итераций. Теоретически при неограниченном числе итераций полученная линия разреза сойдется к секущей плоскости независимо, что справедливо для алгоритмов грубой силы (brute force). На практике количество итераций выбирается из приемлемого соотношения вычислительных затрат и качества получаемого результата. Для используемых в тестовых сценах моделей принималось значение от четырех до восьми.

После итеративной тесселяции анализируется положение каждого из примитивов относительно секущей плоскости. Для треугольников может использоваться достаточно простой критерий: треугольник относится к одной из сторон разреза, если две вершины из трех относятся к этой стороне.

Здесь также следует отметить, что при использовании объемных моделей алгоритм работает по такому же принципу: в середине каждого из шести ребер тетраэдра появляется новая вершина, он разбивается на восемь новых тетраэдров. Но критерий отнесения новых тетраэдров к какой-либо стороне сечения усложняется, так как при наличии четырех вершин невозможно анализировать расположение простым большинством. А пространственная организация тесселированного тетраэдра не позволяет использовать четкий

логически и физически обоснованный критерий, справедливый во всех возможных случаях, что ведет к использованию косвенных критериев.

На третьем этапе происходит раздвижение тканей в разные стороны от секущей плоскости. Эффект раздвижения может достигаться двумя приемами: использованием свойств физического натяжения ткани, эмулируемых физическим движком, или заданным перемещением по нормали от плоскости разреза.

Достоинством такого алгоритма, безусловно, является его регулярность и достаточная алгоритмическая простота, т. е., по сути, на любом этапе и с любым примитивом производится только одна операция — тесселяция.

Несмотря на успешное тестирование, в процессе практического использования подобного алгоритма выявились его существенные недостатки:

- зависимость качества получаемого результата от числа итераций;

- высокая вычислительная нагрузка, которая ведет к тому, что в режиме реального времени может осуществляться сечение только с одной или двумя итерациями в зависимости от сложности каркаса, тогда как приемлемые по качеству результаты получаются после 4—8 итераций, также в зависимости от сложности каркаса;

- условие отнесения нового примитива после тесселяции к одному или другому краю разреза приближенно и не всегда адекватно физическим параметрам (например, расположению центра тяжести).

Практически данный алгоритм может быть использован для обработки объектов, включающих небольшое число примитивов, а также в тех случаях, когда важно контролировать результат обработки данных об объекте (ведь используется только одна операция регулярной тесселяции с известным заранее результатом) или требуется значительно повысить детальность представления объекта в зоне разреза. Но поскольку важнейшим для практического использования тренажера является требование работы в реальном масштабе времени, то авторами разработан и внедрен алгоритм разреза с отсечением примитива по секущей плоскости, осуществляемый в одну итерацию.

### Алгоритм разделения по плоскости

Основным отличием данного алгоритма от предыдущего, как следует из названия, является то, что разбиение примитивов происходит строго по секущей плоскости, а не по какому-то заранее заданному регулярному правилу. Таким образом, отпадает необходимость итератив-

но производить многократную тесселяцию для получения краев разреза, близких к линии сечения.

На первом этапе, так же как и в алгоритме регулярной тесселяции, определяются пересечения ребер треугольника секущего инструмента и плоскостей треугольников поверхности и наоборот. За тем лишь исключением, что кроме отнесения примитивов к области разреза производится обнаружение непосредственно точек контакта (рис. 3, а), после чего они соотносятся с ребрами примитива (рис. 3, б).

На втором этапе все примитивы области разреза также подвергаются тесселяции, но уже не по регулярному закону, а в соответствии с правилом, что точка контакта делит примитив на новые примитивы, количество которых равно количеству ребер исходного. При этом последовательно обрабатываются все точки контакта (рис. 3, в). В результате получается набор точек, принадлежащих границе разреза (рис. 3, г). Данные точки, а также ребра, которые их включают, дублируются, так как край разреза должен быть целостным с обеих его сторон (на рис. 3, д эти стороны условно обозначены «+» и «-» в зависимости от знака уравнения секущей плоскости

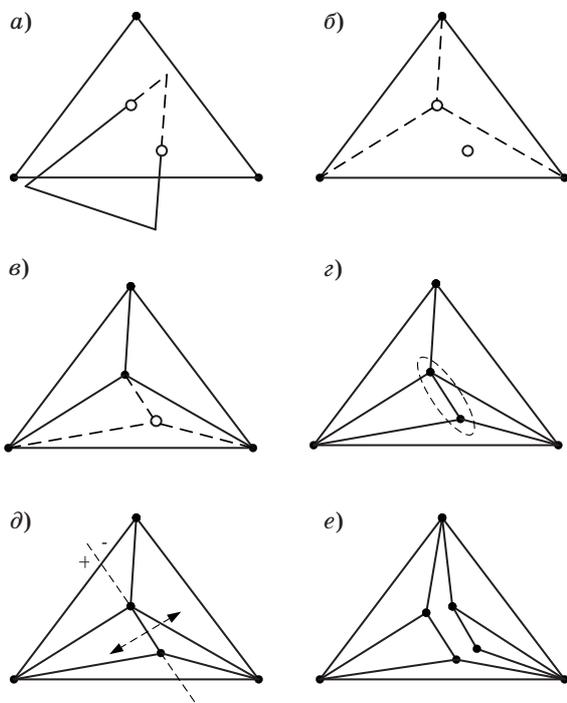
с данной стороны разреза). В результате разреза образуются новые поверхности (рис. 3, е).

На третьем этапе происходит раздвижение тканей точно так же, как в алгоритме, рассмотренном выше.

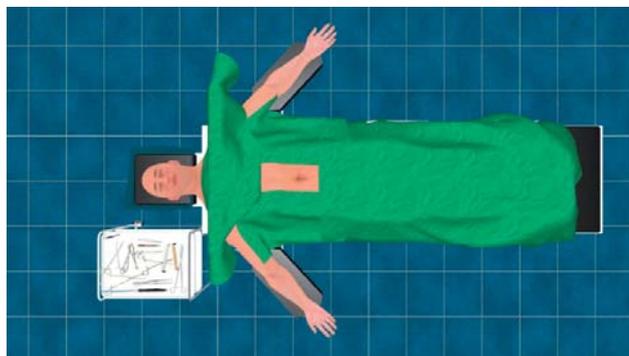
### Заключение

Для демонстрации результатов приведена одна из тестовых сцен верхнесрединной лапаротомии. На рис. 4 показано операционное поле перед началом операции.

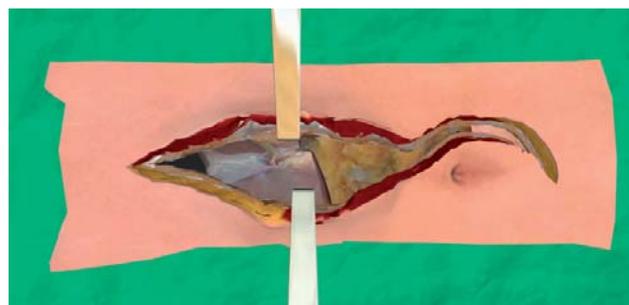
Результат разреза кожного покрова и мягких тканей с использованием второго алгоритма представлен на рис. 5. При этом эмулируется три слоя покрова: кожа, подкожная и жировая прослойки. На рисунке показан момент разреза самого нижнего слоя с применением виртуального инструмента «ножницы». В процессе выполнения тестового задания контролируется максимальный набор параметров, определяющих оценку правильности и эффективности его реализации, в частности, общее время проведения, правильность выбора инструментов, длина разрезов, касания тканей и органов, ориентация инструментов и др.



■ **Рис. 3.** Разделение примитива:  
 а — обнаружение точек пересечения;  
 б — определение ребер примитива;  
 в — обработка пересечения; г — определение границы разреза; д — выполнение разреза;  
 е — образование новых поверхностей



■ **Рис. 4.** Тестовая сцена перед началом операции



■ **Рис. 5.** Разрез тканей

Предложенные авторами алгоритмы позволили решить задачу имитации разреза объектов сцены виртуальными хирургическими инструментами при создании тренажера лапаротомии (открытой хирургии) в составе АПК «Виртуальный хирург».

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (шифр 2011-2.7-527-062).

## Литература

1. Колсанов А. В. и др. Разработка и внедрение современных медицинских технологий в систему медицинского образования / А. В. Колсанов, Р. Р. Юнусов, Б. И. Яремин, С. С. Чаплыгин, А. С. Воронин, Б. Д. Грачев, А. А. Дубинин, А. К. Назарян // Врач-аспирант. 2012. № 2.4(51). С. 584–588.
2. Бодин О. Н., Кузьмин А. В., Митрошин А. Н. Разработка визуальной модели сердца для обучения студентов-медиков // Изв. вузов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2007. № 2. С. 3–10.
3. Филимонов В. С., Талибов О. Б., Вёрткин А. Л. Эффективность симуляционной технологии обучения врачей по ведению пациентов в критических ситуациях // Врач скорой помощи. 2010. № 6. С. 9–19.
4. Lim Y.-J., Jin W., De S. On some recent advances in multimodal surgery simulation: A hybrid approach to surgical cutting and the use of video images for enhanced realism // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. Vol. 16. N 6. 2007. P. 563–583.
5. Bielser D. A framework for open surgery simulation // A dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Diss. ETH No. 14900. Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich, 2003. – 152 p.
6. Батраков М. Ю. и др. Тренажер для симуляционного обучения эндоскопическому оперативному вмешательству / М. Ю. Батраков, Н. А. Горбаченко, Д. Ю. Зайцев, Н. В. Сапцин, А. В. Иващенко, С. С. Чаплыгин, А. В. Колсанов // Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ 2012): тр. науч.-техн. конф., Самара, 2012 г. / СИЦ РАН, 2012. С. 269–273.
7. Akenine-Moller T., Haines E., Hoffman N. Real-time rendering. Third ed. – CRC Press, 2008. – 1048 p.
8. Бодин О. Н., Кузьмин А. В. Разработка фрактального алгоритма для построения трехмерной модели сердца // САПР и графика. 2005. № 3. С. 73–75.

УДК 629.735.33

## МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ В ДИАГНОСТИКЕ УРОЛИТИАЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРЕДОБРАБОТКИ ДАННЫХ

**Н. И. Эюбова<sup>1</sup>,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается задача построения классификатора для диагностики уролитиаза с предварительной обработкой данных, включающей снижение размерности и применение нечеткого вывода. Классифицирующие правила выбираются из деревьев решений, фаззифицируются и валидируются медиком-экспертом. Полученные результаты показывают, что предлагаемые методы предварительной обработки данных улучшают точность диагностики уролитиаза.

**Ключевые слова** — задача классификации, деревья решений, нечеткая логика, медицинская диагностика, уролитиаз.

### Введение

Выявление и адаптация приемлемого подхода для анализа многомерной медицинской информации — непростая задача. Рассматривается диагностика уролитиаза по данным общего и биохимического анализа мочи и крови. Уролитиаз является распространенным заболеванием, им страдают более 38 % пациентов уролитических стационаров. Несмотря на современные эффективные и дорогостоящие методы лечения, очень часто возникает рецидив заболевания. Стандарты уролитической помощи не содержат методов ранней диагностики урологических заболеваний, и настоящее исследование направлено на заполнение этого пробела.

В работе использовались методы классификации, доказавшие свою состоятельность при построении систем поддержки принятия решений в медицине и биологии [1, 2]. Предобработка данных заключалась в снижении размерности методом главных компонент и конструировании атрибута с применением нечеткой логики.

Исходные данные состоят из количественных и порядковых атрибутов (шкалу порядка см.

в работе [3]). Множество значений порядкового атрибута не отражает результат подсчетов или измерений, но на нем введен порядок, соответствующий «уровням», «степеням», «стадиям» и т. п.

Формирование области значений порядкового атрибута связано с закруглением соответствующей характеристики исследуемого объекта. Например, атрибут «холодовая проба» имеет два значения: 0 — не выпал осадок, 1 — выпал осадок. В пограничных ситуациях специалист вынужден выбрать одно из этих значений, хотя вербально он бы сформулировал «мутная жидкость», «небольшой осадок» и т. п. Введение лингвистических переменных позволяет описать пограничные состояния, увеличив количество информации по сравнению с порядковой шкалой. В настоящем исследовании подтверждается, что применение лингвистических и нечетких правил повышает качество диагностики уролитиаза.

### Материалы и методы

В качестве атрибутов многомерной медицинской информации выступали 18 показателей общего и биохимического анализов крови и мочи, наиболее применимые в медицинской практике [4, 5]: относительная плотность, Ph, фосфор неорганический (0,83—1,48) ммоль/л крови, ос-

<sup>1</sup> Научный руководитель — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры бизнес-информатики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения А. В. Тишков.

молярность мочи (500—900), цитрат, оксалат, холодовая проба, калий в моче, альбумин в крови, кальций ионизированный (1,06—1,32 ммоль/л), экскреция тируемых кислот [ммоль/л], мочевины мочи, соли, С-реактивный белок (0,00—7,5 мг/л), цвет, прозрачность, белок [г/л], бактерии.

Исходные данные представлены в виде как порядковых (холодовая проба, цвет, прозрачность, бактерии), так и количественных (остальные 14 показателей) атрибутов.

В исследовании применялись пять классификаторов: метод опорных векторов, метод  $k$ -ближайших соседей, наивный байесовский классификатор, нейронные сети и метод деревьев решений. В задаче диагностики рассматривается два класса: здоров и болен уролитиазом. Для предобработки данных использовались метод главных компонент, нечеткие правила и выводы.

Исследуемая выборка состояла из двух групп. Группа больных уролитиазом составила 45 чел. (22 женщины, 23 мужчины) в возрасте от 25 до 60 лет. При обучении классификатора эта группа была сопоставлена с классом «здоровые». Группа контроля была сформирована из 35 практически здоровых добровольцев, сопоставленная с классом «больные». Группа контроля сопоставима с группой больных по полу и возрасту.

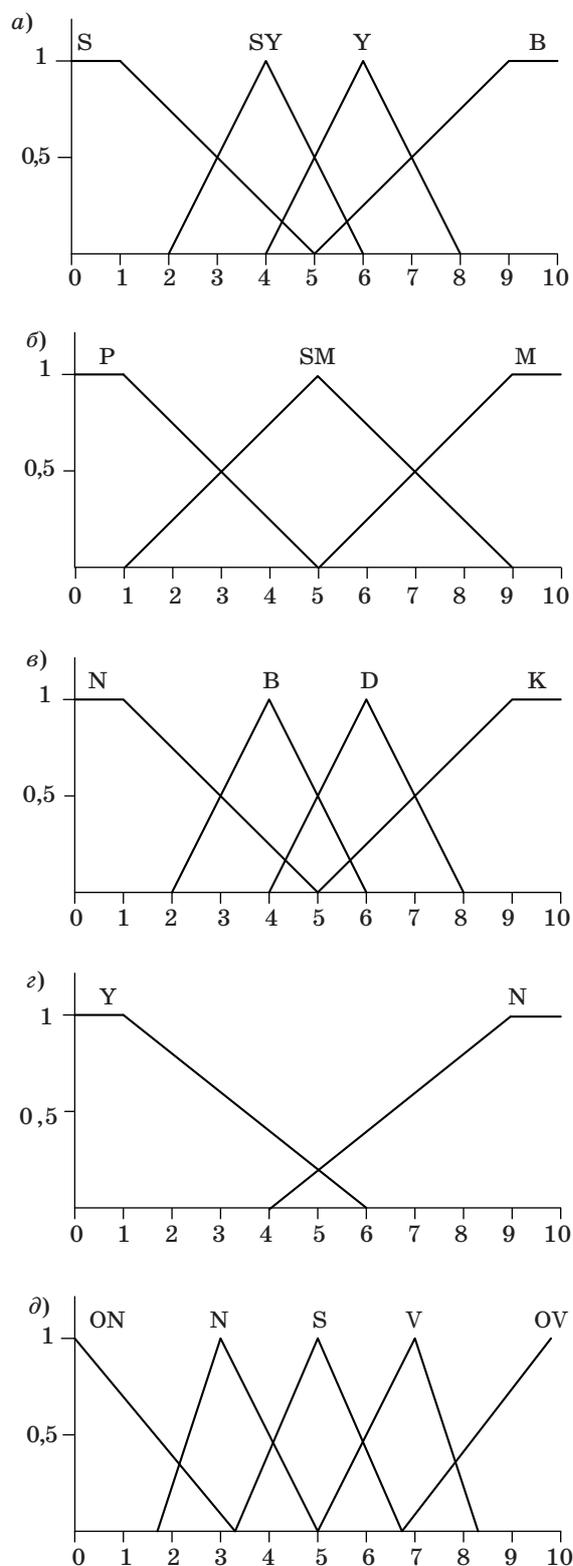
Классификаторы были построены с помощью программного обеспечения Rapid Miner. Для вычислений методом главных компонент использовалась программа MatLab (версия 5). Разработка нечетких правил осуществлялась в пакете Fuzzy Logic Toolbox.

### Нечеткие правила

Нечеткие рассуждения основаны на понятии лингвистической переменной, которое будет использоваться для всех порядковых атрибутов. Применение нечетких правил к полученным лингвистическим переменным даст нечеткую оценку наличия заболевания для каждого пациента, которая затем дефазифицируется в выходную переменную с целочисленной областью значений на отрезке от 0 до 10. В результате генерируется новый атрибут, добавляемый к исходным.

Основной набор правил выбирается из деревьев решений при помощи эксперта и фазифицируется. Деревья решений строятся на порядковых атрибутах при помощи известных алгоритмов классификации. Классов, как и в основной задаче диагностики уролитиаза, два: «здоров», «болен».

В нечеткой модели предполагается использовать 4 входные переменные и одну выходную переменную (рис. 1,  $a-d$ , табл. 1). В качестве



■ Рис. 1. Функции принадлежности термов входных переменных «Цвет» ( $a$ ), «Прозрачность» ( $b$ ), «Бактерии» ( $c$ ), «Холодовая проба» ( $d$ ) и выходной переменной «Вероятность наличия заболевания» ( $d$ )

■ **Таблица 1.** Терм-множества входных и выходной переменных

Наименование переменной	Терм-множество	
	Множество	Символический вид
<b>Входные переменные</b>		
Цвет	T1={«соломенная», «слабо желтая», «желтая», «бурая»}	T1={S, SY, Y, B}
Прозрачность	T2={«прозрачная», «слабо мутная», «мутная»}	T2={P, SM, M}
Бактерии	T3={«нет», «бактерии», «дрожжи», «кандида»}	T3={A, B, C, D}
Холодовая проба	T4={«осадок присутствует», «осадок отсутствует»}	T4={Y, N}
<b>Выходная переменная</b>		
Вероятность наличия заболевания	T5={«очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая»}	T5={NB, NS, Z, PS, PB}

входных переменных используются только качественные параметры многомерных медицинских данных. В качестве выходной переменной используется вероятность обнаружения у пациента наличия мочекаменной болезни.

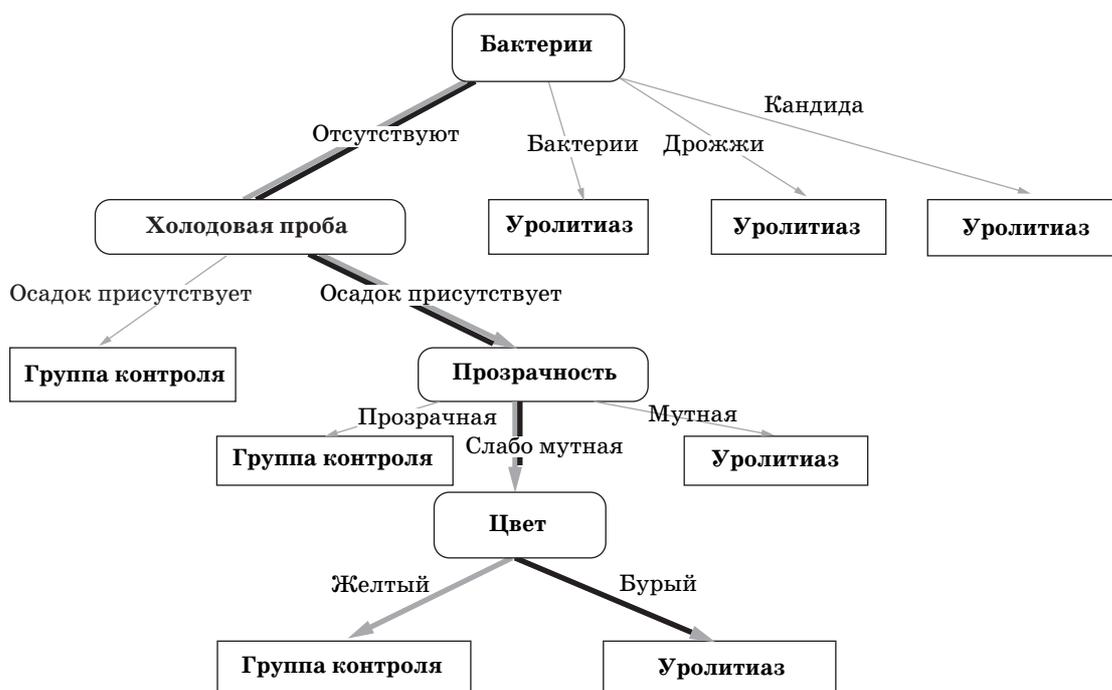
После определения содержательной постановки задачи была построена ее нечеткая модель

в форме соответствующей системы нечеткого вывода. При построении нечеткой модели оценки вероятности обнаружения у пациента наличия уролитиаза была использована шкала в баллах в интервале от 0 до 10.

Следующим этапом построения модели является построение базы нечетких правил. Для этой цели использовались четкие правила, сгенерированные на основе деревьев решений. Стандартные деревья решений построены на всех атрибутах и только на порядковых имеют небольшую точность согласно кросс-валидации. Поэтому эксперту было предоставлено дерево решений, построенное на порядковых атрибутах (рис. 2), и набор деревьев решений, полученных согласно процедуре классификации «случайный лес».

Эксперт выбирал правила из деревьев решений и на их основе формулировал собственные нечеткие правила. Всего экспертом была сформулирована 71 нечеткая продукция (табл. 2). На рис. 2 жирными стрелками выделены два правила, которые эксперт использовал явным образом в нечеткой системе (правила 16, 26).

Метод Мамдани использован в качестве схемы нечеткого вывода, методом активации является MIN. Во всех шагах в качестве логической связи для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция «И»), поэтому в качестве метода агрегирования использовалась операция min-конъюнкции. Для аккумуляции заключений



■ **Рис. 2.** Дерево решений

■ Таблица 2. Правила нечетких продукций для рассматриваемой системы нечеткого вывода

№	Цвет	Прозрач-ность	Бакте-рии	Холодо-вая проба	Вероятность наличия заболевания	№	Цвет	Прозрач-ность	Бакте-рии	Холодо-вая проба	Вероятность наличия заболевания
1	-	-	-	N	ON	37	Y	M	K	Y	OV
2	-	-	N	N	ON	38	SY	M	K	Y	OV
3	-	P	N	N	ON	39	S	M	K	Y	OV
4	S	P	N	N	ON	40	B	SM	K	Y	OV
5	S	SM	N	N	ON	41	Y	SM	K	Y	OV
6	SY	P	N	N	ON	42	SY	SM	K	Y	OV
7	SY	SM	N	N	N	43	S	SM	K	Y	OV
8	Y	SM	N	N	N	44	B	P	K	Y	OV
9	B	SM	N	N	N	45	Y	P	K	Y	OV
10	SY	M	N	N	N	46	SY	P	K	Y	OV
11	Y	M	N	N	N	47	S	P	K	Y	OV
12	B	M	N	N	S	48	B	M	D	Y	OV
13	S	P	N	Y	S	49	Y	M	D	Y	OV
14	SY	P	N	Y	S	50	SY	M	D	Y	OV
15	Y	P	N	Y	S	51	S	M	D	Y	OV
16	S	SM	N	Y	S	52	B	SM	D	Y	OV
17	B	P	B	N	S	53	Y	SM	D	Y	OV
18	Y	P	B	N	S	54	SY	SM	D	Y	OV
19	SY	P	B	N	S	55	S	SM	D	Y	OV
20	S	P	B	N	S	56	B	P	D	Y	OV
21	SY	SM	B	N	S	57	Y	P	D	Y	OV
22	S	SM	B	N	S	58	SY	P	D	Y	OV
23	B	M	N	Y	V	59	S	P	D	Y	OV
24	Y	M	N	Y	V	60	B	M	B	Y	OV
25	SY	M	N	Y	V	61	Y	M	B	Y	OV
26	B	SM	N	Y	V	62	SY	M	B	Y	OV
27	Y	SM	N	Y	V	63	S	M	B	Y	OV
28	SY	SM	N	Y	V	64	B	SM	B	Y	OV
29	B	P	N	Y	V	65	Y	SM	B	Y	OV
30	Y	P	N	Y	V	66	SY	SM	B	Y	OV
31	B	M	B	N	V	67	S	SM	B	Y	OV
32	Y	M	B	N	V	68	B	P	B	Y	OV
33	SY	M	B	N	V	69	Y	P	B	Y	OV
34	B	SM	B	N	V	70	SY	P	B	Y	OV
35	Y	SM	B	N	V	71	S	P	B	Y	OV
36	B	M	K	Y	OV						

Без предварительного снижения разрядности и без использования нечетких правил, точность (60 ± 18,37) %			
	Фактический класс 0	Фактический класс 1	Точность распознавания
Предполагаемый класс 0	25	19	56,82 %
Предполагаемый класс 1	10	26	72,22 %
Точность предсказания	71,43 %	57,78 %	
С использованием нечетких правил, точность (63,75 ± 19,72) %			
	Фактический класс 0	Фактический класс 1	Точность распознавания
Предполагаемый класс 0	25	19	56,82 %
Предполагаемый класс 1	10	26	72,22 %
Точность предсказания	71,43 %	57,78 %	
С предварительным снижением размерности и без использования нечетких правил, точность (60,00 ± 9,35) %			
	Фактический класс 0	Фактический класс 1	Точность распознавания
Предполагаемый класс 0	11	8	57,89 %
Предполагаемый класс 1	24	37	60,66 %
Точность предсказания	31,43 %	82,22 %	
С предварительным снижением размерности и использованием нечетких правил, точность (68,75 ± 16,06) %			
	Фактический класс 0	Фактический класс 1	Точность распознавания
Предполагаемый класс 0	27	17	61,36 %
Предполагаемый класс 1	8	28	77,78 %
Точность предсказания	77,14 %	62,22 %	

■ Рис. 3. Точность классификатора на основе метода опорных векторов

■ Таблица 3. Точность классификаторов согласно кросс-валидации, %

Метод	Классификатор без предварительного снижения размерности	Классификатор с предварительным снижением размерности, без использования нечеткой логики	Классификатор без предварительного снижения размерности, с использованием нечеткой логики	Классификатор с предварительным снижением размерности и добавлением нового атрибута
Опорных векторов	60	60	63,75	68,75
<i>k</i> -ближайших соседей	52,5	52,5	52,5	53,75
Наивный байесовский классификатор	62,5	62,5	67,5	61,25
Нейронные сети	53,75	62,5	57,5	61,25

*k*-ближайших соседей, наивный байесовский классификатор, нейронные сети. Оценка классификаторов производилась с помощью методов кросс-валидации. В качестве примера на рис. 3 показано различие между точностью классификации пациентов согласно кросс-валидации с использованием метода опорных векторов.

Результаты точности работы всех классификаторов без предобработки и с предобработкой сведены в табл. 3.

Классификаторы без предобработки показали довольно посредственный результат: точность определения наличия заболевания с помощью процедуры кросс-валидации составила в среднем 57,19 %.

Уровень точности после снижения размерности повысился в среднем на 2,19 %, данное значение остается посредственным (59,38 %). Такой результат можно объяснить загрубленной оценкой порядковых атрибутов. Фазсифицируя эти атрибуты с помощью лингвистических переменных, эксперты могут дать больше информации о градации соответствующих данных. В результате использования нечетких правил набор исходных атрибутов дополнился новым атрибутом, отражающим вероятность наличия заболевания по порядковым атрибутам. Уровень точности после добавления нового атрибута в среднем увеличился на 3,13 % и составил

правил использовался метод тах-дизъюнкции. В качестве метода дефазсификации планируется использовать метод центра тяжести.

### Результаты и обсуждение

Для определения уровня точности использовались метод опорных векторов, метод

60,31 %. Такой уровень уже можно признать удовлетворительным.

### Заключение

В данной статье приведен пример использования нечеткой логики в совокупности с методами интеллектуального анализа данных (Data Mining) и привлечением эксперта. Нечеткие правила были сформулированы с применением деревьев решений и привлечением эксперта — заведующего кафедрой клинической лабораторной диагностики с курсом молекулярной СПбГМУ им. академика И. П. Павлова, доктора медицинских наук, профессора В. Л. Эмануэля.

Совместное применение нескольких математических методов обработки данных позволило повысить точность классификации, согласно результатам кросс-валидации, в среднем на 4,06 %. Максимальное увеличение точности было достигнуто с использованием классифика-

тора на основе метода опорных векторов и составило 8,75 %.

### Литература

1. Дюк В. А., Самойленко А. П. Data Mining: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.
2. Дюк В., Эмануэль В. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях. – СПб.: Питер, 2003. – 528 с.
3. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы: Теория и технология разработки / под ред. А. М. Яшина/СПбГТУ. – СПб., 2001. – 711 с.
4. Simerville J. A., Maxted W. C., Pahira J. J. Urinalysis (review)// Amer. Fam. Physician. 2005. Vol. 71. N 6. P. 1153–1162.
5. Эмануэль В. Л. Пособие для семейного врача по лабораторным технологиям и интерпретации исследования мочи: учеб. пособие. – СПб.: Триада; Тверь: Триада, 2007. – 128 с.

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющихся в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 005.8:615.478

## РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ «SMART FACTORY» ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**В. Ф. Шпилевой,**

заместитель исполнительного директора  
ОАО «Кузнецов», г. Самара

**П. О. Скобелев,**

доктор техн. наук, директор по разработкам

**Е. В. Симонова,**

канд. техн. наук, доцент, ведущий аналитик

**А. В. Царев,**

генеральный директор

**С. С. Кожевников,**

директор аналитического центра

**Э. В. Кольбова,**

ведущий аналитик

**И. В. Майоров,**

ведущий специалист исследовательского отдела

**Я. Ю. Шепилов,**

ведущий разработчик

ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара

Описаны принципы разработки мультиагентной системы «Smart Factory», предназначенной для управления ресурсами производственных цехов машиностроительных предприятий в режиме реального времени. Мультиагентная технология обеспечивает возможность гибко реагировать на непредвиденные события, возникающие в условиях производственного процесса, что позволяет планировать, оптимизировать и контролировать работу персонала предприятий в реальном времени. Представлены разработанный метод адаптивного планирования ресурсов, основные функции, архитектура и интерфейс системы. Показано, что внедрение интеллектуальной системы «Smart Factory» дает возможность выполнить работу в заданные сроки, снизить затраты и уменьшить риски.

**Ключевые слова** — управление ресурсами, машиностроительное производство, мультиагентная технология, интеллектуальная система, оперативное планирование, режим реального времени.

### Введение

Мультиагентная система «Smart Factory» направлена на повышение эффективности работы производственных цехов машиностроительных предприятий. В условиях любого машиностроительного завода это достигается путем гибкой согласованной корректировки производственных планов в ответ на изменения в окружающей среде в зависимости от возникающих событий. В результате в системе должны одновременно осуществляться процессы распределения ресурсов, планирования, оптимизации, мониторинга

и контроля выполнения заказов в режиме реального времени.

Система может применяться на машиностроительных заводах, которые характеризуются постоянными инновациями, существенной сложностью изделий и высокой динамикой изменений в среде, а также априорной неопределенностью спроса и предложения, требующей адаптивности при реакции на непредсказуемые события в режиме реального времени.

Система также полезна для создания специфической базы знаний о производственных процессах, изделиях и материалах, оборудовании и

работниках для обеспечения индивидуального подхода к каждому заказу или ресурсу, позволяет строить более точные и физически исполнимые планы при любых событиях, к числу которых можно отнести появление высокоприоритетного заказа, отказ оборудования, задержку в поставке материалов и т. д.

### Современное состояние исследований и разработок в рассматриваемой области

Несмотря на значительный прогресс в развитии теории оптимизации и создании крупномасштабных систем планирования ресурсов предприятия (ERP-системы), возможности предприятий по развитию адаптивной системы планирования остаются очень ограниченными [1, 2]. Традиционные ERP-системы включают в себя подсистемы сбора заказов, крупные базы данных для заказов и ресурсов, подсистемы учета и отчетности и множество других компонентов. Однако в этих системах поддерживается пакетное планирование, допускающее ручную корректировку. Системы планирования, предлагаемые такими известными компаниями как SAP, Oracle, JDA, i2, ILOG, Preactor и др., обычно реализуют ограниченные методы программирования, основанные на комбинаторном поиске вариантов в сочетании с некоторой эвристикой [1, 2].

Эти методы и инструменты разработаны в соответствии с предположением, что входные заказы и ресурсы для их выполнения известны заранее и не меняются в процессе планирования и выполнения плана. Но в реальной жизни ситуация совершенно другая: появились новые заказы, заказ отменен или перенесен, оборудование сломалось, работник отсутствует, не хватает детали и т. д.

В результате на практике многие классические методы планирования и оптимизации ресурсов имеют ряд существенных ограничений:

- не учитывают сложность современных производственных предприятий, работающих с тысячами заказов и ресурсов, и не отражают интересы многих участников, вовлеченных в процесс производства;

- не предоставляют возможности для адаптивного планирования в реальном времени, что требует динамического разрешения конфликта в зависимости от ситуации при планировании с поддержкой взаимозависимости между всеми заказами и операциями;

- предполагают все заказы и ресурсы идентичными, но на практике каждый из них имеет свои собственные индивидуальные критерии, предпочтения и ограничения, которые могут изменяться в ходе работы;

- не предоставляют инструментов формализации и накопления знаний, которые специфичны для отдельного предприятия и влияют на качество планирования, например, набор навыков каждого работника;

- не позволяют оператору легко и в интерактивной форме настраивать процесс планирования, а также интерактивно дорабатывать результаты планирования и т. д.

Поэтому многие диспетчеры цехов до сих пор на практике используют Excel-таблицы для ручного планирования и оптимизации ресурсов.

### Метод адаптивного планирования на основе мультиагентной технологии

В отличие от традиционных систем планирования ресурсов предприятий, работающих в пакетном режиме (в рамках ежедневных, еженедельных, ежемесячных циклов планирования), предлагаемая система, в зависимости от возникающих событий, постоянно функционирует на сервере в режиме реального времени, позволяя адаптивно проводить перепланирование выбранных заказов и ресурсов, на которые оказывают влияние приходящие события. Разработанный метод адаптивного планирования в реальном времени основан на мультиагентной технологии [3, 4] с использованием онтологии, которая включает типичные классы оборудования, технические характеристики структуры продукции и технологические процессы (наборы связанных операций), навыки работников и т. д.

Адаптивность означает, что даже «небольшое» событие может вызвать неожиданно длинную цепь изменений в планах, находящихся в «неустойчивом равновесии» (система никогда не останавливается), и даже влиять на план всего цеха. Но на практике эти «волны изменений» ограничены премиями и штрафами виртуального рынка агентов и могут быстро затухать или быть принудительно остановлены после определенного числа шагов.

План работ цеха строится не просто как статичный файл данных, полученный в виде классического комбинаторного поиска, но как баланс интересов вовлеченных в процесс агентов потребностей и возможностей, достигаемый путем выявления конфликтов и проведения переговоров агентов. В процессе переговоров система учитывает текущее состояние планов, значимость заказов, структуру продукции, технологические процессы, навыки работников, доступность оборудования, материалов и инструментов, последовательность работы и время выполнения операций.

При необходимости диспетчер цеха может активно вмешаться в план в интерактивном ре-

жиме в любое время, проведя ручную доработку плана (по принципу «drag & drop» — «потянуть и бросить»), при этом для всех зависимых операций план будет автоматически изменен. Результаты планирования для работников отражаются на сенсорных терминалах, поддерживающих возможность интерактивной коммуникации с менеджерами, инженерами и рабочими.

Все эти функции дают возможность существенно сократить сложность планирования и сделать его более быстрым, адекватным, точным, достоверным, а также удобным для пользователя. Пользователи могут имитировать приход нового заказа и проверить, как он будет размещен в текущем производственном плане и как повлияет на другие заказы, например, сдвинет или вытеснит размещенный ранее менее значимый заказ или приведет к задержке выполнения других заказов.

### Функциональные возможности системы

Рассматриваемая система работает автономно и предлагает следующие возможности по управлению ресурсами:

- сохранение характеристик оборудования, процессов и технологии;
- автоматический импорт продукции и технологических процессов из CAD-систем;
- введение нового заказа или других важных событий в любое время;
- моделирование и оценку того, как новый заказ влияет на предыдущие заказы, его планирование и запуск на исполнение;
- проверку стоимости этого заказа в новых условиях;
- адаптивное и гибкое перераспределение и перепланирование ресурсов;
- проактивную оптимизацию производственного плана (при наличии времени);
- визуализацию сформированного плана в режиме реального времени;
- поддержку применения нескольких стратегий планирования с различными критериями;
- интерактивное улучшение планов для всех ресурсов;
- связь с пользователями для координации и согласования действий;
- назначение задач на каждый рабочий день по каждому рабочему в режиме реального времени (динамическое сменно-суточное задание);
- мониторинг и контроль выполнения задач;
- регистрацию обратной связи от рабочих по задачам (начало — остановка — задержка — выполнение);
- оперативный контроль разницы между производственным планом и фактом выполнения;

— перепланирование в случае роста разрыва между планом и фактом;

— автоматические отчеты на бизнес-радаре в реальном времени.

В систему могут быть интегрированы существующие программы по складскому учету, расчету заработной платы, бухгалтерскому учету и отчетности и т. д.

### Архитектура и типовой интерфейс системы

Система адаптивного планирования (рис. 1) построена на основе мультиагентной технологии, использующей концепцию виртуального рынка для организации коммуникации между агентами, а также онтологию для представления знаний предметной области и описания моделей ситуаций (сцен), возникающих в процессе планирования [3, 4].

*Мир агентов сети потребностей и возможностей (ПВ-сети) / Виртуальный рынок (Virtual World of Resource-Demand Networks / Virtual Market)* — место работы агентов ПВ-сети, в котором запускаются и исполняются экземпляры классов агентов. Агенты могут под управлением исполняющей системы создаваться и уничтожаться в мире, существовать в мире, принимать и передавать сообщения, обращаться в сцену для чтения информации, записывать информацию в сцену, подписываться на события и получать уведомления и т. д.

*Онтология (Ontology)* — структура данных, представляющая собой модель знаний предметной области, которая используется для построения моделей начальных ситуаций или их корректировки. Имеются базовые онтологии, которые могут дополняться специализированными для предметной области понятиями и отношениями, а также специальными расширениями для каждого отдельного предприятия.

Архитектура системы состоит из четырех основных уровней: платформы, продукта, предметной области, приложения (см. рис. 1).

*Исполняющая система (Run Time Multi-Agent Execution System)* — подсистема, обеспечивающая асинхронное выполнение программ агентов при переходе из одного состояния в другое (диспетчер агентов) и передачу сообщений между агентами, при котором агент получает «квант» времени на обработку событий и далее возвращает управление диспетчеру для продвижения следующих агентов, т. е. агенты работают как сопрограммы.

*Очередь событий (Event Queue)* — подсистема, обеспечивающая накопление событий, приходящих из внешнего мира, и их последовательную обработку. Система управляется собы-



■ Рис. 1. Структура модуля адаптивного планирования

тиями, при каждом событии сохраняется метка времени его поступления. Порядок поступления событий на обработку регулируется, когда следующее событие поступает после завершения обработки предыдущего, при этом в первую очередь выбираются приоритетные события и т. д.

**Конструктор онтологий (Ontology Editor)** позволяет вручную корректировать начальную сцену или вносить в нее изменения в ходе работы.

**Библиотеки планирования (Basic Virtual Market & Domain-Specific Extensions)** содержат базовые и специализированные компоненты, обеспечивающие работу классов агентов ПВ-сети и их переговоры на виртуальном рынке (например, выявление конфликтов, определение зон перекрытия, расчет сдвигов и т. п.), доступ к сцене, содержащей формализованную модель ситуации, а также эластичную обработку критериев, предпочтений и ограничений агентов, расчеты микроэкономики и поддержку счетов агентов и другие функции.

**Специализированные компоненты и интеграция со сторонними системами (3rd Party & Integration Components)** — компоненты, которые позволяют выполнять дополнительные функции для предметной области (например, расчет расстояний по карте для грузовиков и т. д.).

**Сцены мира (Scene of the World)** — основные структуры данных, которые содержат формализованную модель ситуации во внешнем мире, могут уточняться через онтологию и корректироваться событиями. Сцена содержит первоначальное описание ситуации, которое далее постепенно трансформируется в решение проблемы с учетом поступающих событий. В результате сцена содержит новый план действий для пользователя (водителя грузовика, мастера, рабочего и т. д.).

**База данных (Data base)** позволяет сохранять исходные и промежуточные сцены, а также сцены с результатом решения проблемы.

Ключевая логика системы планирования реализована в составе агентов, которые функционируют от имени заказов, продукции, работников, станков, материалов и т. д. В процессе жизненного цикла агенты могут реагировать на события, но также функционировать проактивно, выявляя в плане проблемы и пытаясь их решить.

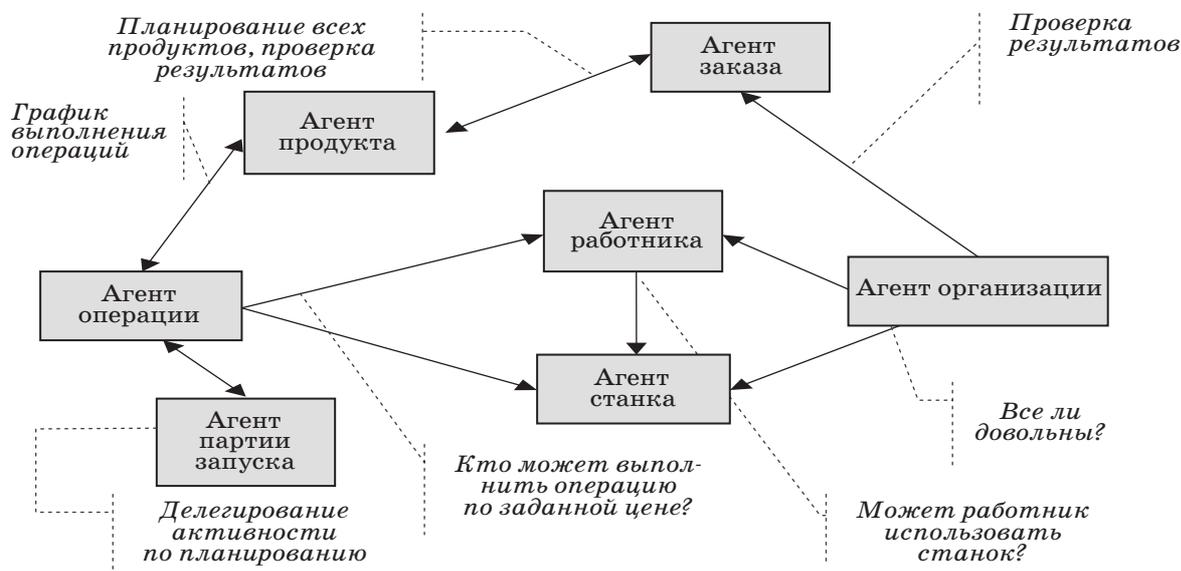
Список разработанных ключевых агентов представлен в таблице.

Основные направления переговоров между агентами показаны на рис. 2.

План цеха представляет собой сцену мира, которая формируется в виде семантической сети объектов и отношений онтологии планирования,

■ Основные классы агентов

Имя агента	Описание агента	Атрибуты
Заказ	Заказ ищет лучшие возможности для реализации	Стоимость, приоритет, срок, другие подробности
Организация	Пытается достигнуть и улучшить ключевые показатели эффективности системы, наблюдая за ситуацией, меняет стратегию, вводит ограничения и предпочтения для обеспечения согласования вовлеченных в процесс сторон	Организация, тип организации, руководитель, ответственные, ожидаемые результаты и показатели
Работник	Хочет быть занятым все рабочее время и получать бонусы за качество, производительность и т. д., а также усовершенствовать свои навыки работы для достижения более высокого уровня квалификации	Организация, план, возможности, профессии, известные модели станков, производительность, зарплата
Станок	Хочет быть загруженным как можно больше, но также требует профилактики и ремонта	Организация, модель станка, потребление энергии, график ремонтов
Технологический процесс	Обеспечивает координацию технических операций, необходимых для выполнения заказов	Срок выполнения, операции, материалы, параметры деталей
Технологическая операция	Выполняет поиск наилучших работников и станков с учетом предпочтений по времени завершения/ начала операции	Профессия, разряд, модель станка, продолжительность, предпочтения по времени завершения/ начала
Агент партии запуска	Пытается объединить работы по одинаковым деталям для повышения их эффективности	Внутренние операции
Другие агенты	Материалы, инструменты, транспорт и т. д.	



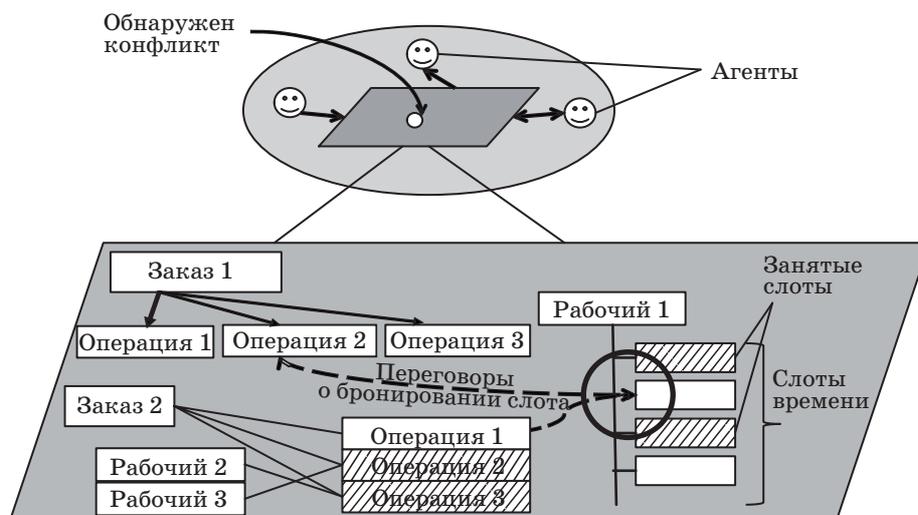
■ Рис. 2. Основные протоколы коммуникации между агентами

связывающих заказы и операции, операции и работников и т. д. (рис. 3). Данные связи постоянно исследуются агентами и помогают им для ограничения комбинаторного поиска и нахождения допустимых вариантов через анализ «топологии» плана (связок операций).

В системе на экране отображаются все заказы цеха с текущим статусом и различными фильтрами для их визуализации (рис. 4). Типовые

статусы заказов: не начат, планируется, начат, выполнен, в процессе подготовки, остановлен, задерживается, отложен и т. д.

Очередь событий дает возможность пользователям вводить информацию о новых событиях и запускать процесс перепланирования, например, ввод в производство нового заказа, компоненты которого отображены слева (рис. 5). Комбинация диаграмм Ганта и Перта показы-



■ Рис. 3. Представление сцены

МАС - Инженер ПДБ

Файл Заказы Справочники Отчеты

Импортировать Обновить статус Пересчитать трудоемкость Состав заказа Дерево ДСЕ Копировать Добавить Редактировать Удалить

Дата з...	Заказчик	Тип зак...	Дата с...	Состоян...	Номер СТО	Фактически...	Планов...	Трудо...	Предва...	Смена	Наимен...	Номер д...	К...	Вид...	Техно...	Приори...	Ц...
18.11...	Холдинг	внутрен...	31.12...	сдан	БИ1886-5671	30.01.2012	110,37	101,8	52,9	№9012...	ПРЕССФ...	ЦТЕА78...	1	12.1...	Закир...	Цеховой	№935
06.05...	Холдинг	ремонт...	31.05...	заплани...	БИ1836-3661	13.03.2012	35,2301	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
02.11...	Холдинг	внутрен...	30.11...	сдан	БИ0604-7556	31.01.2012	275,6356	65,9056	160	№9012...	ПРЕССФ...	ЦТЕА82...	1	28.1...	Закир...	Цеховой	№935
03.11...	Концер...	внутрен...	28.02...	сдан	БИ0611-3029	31.01.2012	431,4644	383,2604	322	№9012...	прессф...	ОБЩ.ПР...	1	17.1...	Голуб...	Заводс...	№965
03.11...	Концер...	внутрен...	29.02...	заплани...	БИ0611-3029/80	13.02.2012	134,43	107,72	17,4	№9012...	прессф...	общ.прим.	4	24.1...	Голуб...	Заводс...	№965
08.09...	Холдинг	ремонт...	30.09...	заплани...	БИ0607-4805	18.04.2012	160,582	29,61	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
12.07...	Холдинг	ремонт...	29.07...	заплани...	БИ1835-3722	14.03.2012	19,652	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
18.10...	Холдинг	ремонт...	31.10...	заплани...	БИ0605-4119	22.02.2012	23,7703	13,03	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Голуб...	Отсутс...	№935
24.11...	Концер...	внутрен...	15.02...	в работе	БИ0607-4665/89	13.02.2012	10,832	0	2,66	№9012...	прессф...	ЮМПИ73...	4	09.0...	Закир...	Заводс...	№965
03.06...	Концер...	ремонт...	30.07...	заплани...	БИ0607-4888	06.03.2012	428,081	303,821	-	№9012...	ПРЕССФ...	ЮМПИ73...	1	-	Голуб...	Отсутс...	№965
02.08...	Холдинг	ремонт...	31.08...	заплани...	БИ1886-5636	19.03.2012	56,758	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
30.11...	Холдинг	ремонт...	30.12...	заплани...	БИ1886-5554	02.03.2012	28,734	4,44	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Голуб...	Отсутс...	№935
29.11...	Холдинг	внутрен...	31.03...	заплани...	БИ0604-7560	27.03.2012	101,47	0	49,5	№9012...	ПРЕССФ...	ДУИ832...	1	19.0...	Закир...	Отсутс...	№935
06.05...	Холдинг	ремонт...	31.05...	заплани...	БИ1836-3892	16.03.2012	22,8601	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
07.12...	Холдинг	ремонт...	30.12...	в работе	В950-7797	16.05.2012	150,422	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Голуб...	Отсутс...	№935
16.08...	Холдинг	внутрен...	31.08...	заплани...	БИ1886-5653	04.04.2012	29,872	0	36	№9012...	ПРЕССФ...	ИЗ86833951	1	25.0...	Голуб...	Отсутс...	№935
08.08...	Холдинг	внутрен...	31.08...	заплани...	БИ1835-4244	03.05.2012	91,34	0	58	№9012...	ПРЕССФ...	ЦЕ78608911	1	18.0...	Закир...	Отсутс...	№935
06.05...	Холдинг	ремонт...	31.05...	заплани...	БИ1836-3776	29.02.2012	22,6801	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
22.09...	Холдинг	внутрен...	31.03...	заплани...	БИ1886-5658	15.03.2012	189,85	47,63	119	№9012...	ПРЕССФ...	ШИКС75...	1	15.1...	Закир...	Цеховой	№935
30.05...	Холдинг	ремонт...	30.06...	в работе	БИ1880-3074	01.06.2012	788,756	0	-	№9012...	ПРЕССФ...	-	1	-	Закир...	Отсутс...	№935
22.11...	Концер...	внутрен...	28.02...	заплани...	БИ0611-3028	12.03.2012	361,58	117,45	353,1	№9012...	прессф...	общ.прим.	1	06.0...	Голуб...	Генера...	№965

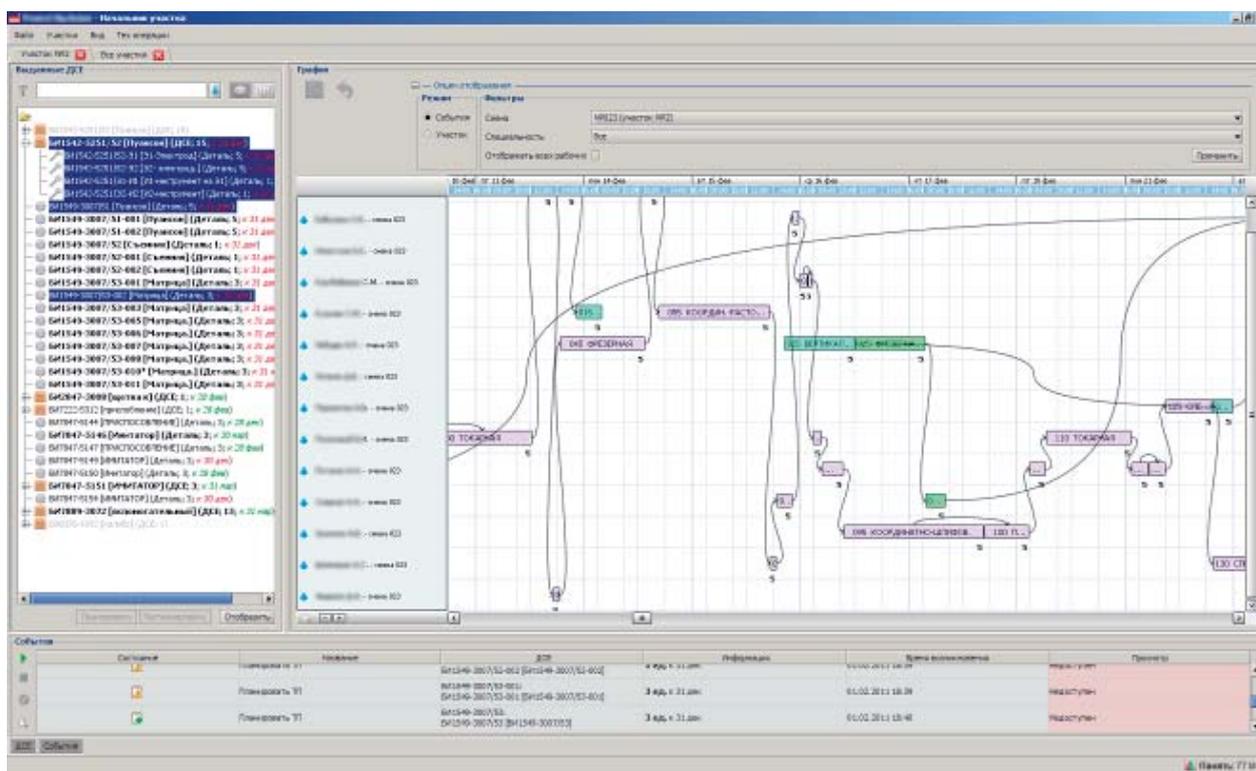
Поиск: прессформа  отобразить сданные  с заготовками  архивированные

Память: 48 Мб

■ Рис. 4. Статусы заказов

вает взаимосвязь между операциями по сборке. Пользователь может выбрать любую операцию и с помощью метода «drag&drop» перетащить ее с одного работника на другого, объединить или разделить операции, скорректировать план по событию, что вызовет соответствующую автома-

тическую цепь изменений во всем плане. Если работник не имеет достаточных навыков для выполнения операции, в случае задержек или других проблем система выделит эту операцию красным цветом и выдаст предупредительное сообщение пользователю.



■ Рис. 5. Результаты планирования по цеху

## Первые результаты внедрения в ОАО «Кузнецов»

Система «Smart Factory» внедрена в ОАО «Кузнецов» — одно из крупнейших российских предприятий по сборке и ремонту авиационных и ракетных двигателей. В качестве пилотного выбран важнейший для предприятия цех № 18, отвечающий за сборку сложных компонент, таких как турбостартеры. Ожидаемые результаты внедрения:

- увеличение производительности цеха на 5—10 % (в зависимости от месяца) с тем же количеством ресурсов;

- быстрый переход от бумажных документов к цифровым технологиям управления цехом;

- подъем прозрачности производственных процессов до 95 % с целью обеспечить более эффективное использование ресурсов и их контроль;

- полная автоматизация процессов планирования и координации для повышения производительности управленческой работы цеха;

- интегрирование с существующей на заводе ERP-системой, в которой рассчитывается заработная плата работников с анализом плана-факта, имеется информация по материально-техническому снабжению и т. д.;

- обеспечение быстрой реакции на непредсказуемые события (новый заказ, поломка обо-

рудования и т. д.) в целях автоматического обновления плана цеха в зависимости от возникающих событий так, чтобы он становился более реалистичным и мог быть использован для прогнозирования «узких мест» в заказах по отношению к ресурсам;

- индивидуальное планирование всех ресурсов и заказов;

- уменьшение негативного человеческого фактора (приписки, ошибки и т. д.) и повышение позитивного за счет более гибкого, надежного, правильного и точного процесса принятия решений;

- значительное сокращение сложности в управлении ресурсами цеха (сейчас ежедневные задачи для сотрудников делаются вручную).

По оценке топ-менеджмента завода, главным результатом проекта должно стать достижение полной прозрачности при планировании ресурсов в цехе. Это позволит увеличить эффективность использования ресурсов и соблюдать сроки работ по заказам за счет своевременного выявления всех «узких мест» и быстрого на них реагирования в режиме реального времени.

Ожидается, что экономия от перехода к управлению в режиме реального времени обеспечит полный возврат инвестиций примерно за 1,4 года.

### Заключение

Интеллектуальная система «Smart Factory» обеспечивает поддержку принятия решений для управления ресурсами в режиме реального времени, что помогает улучшить качество и обеспечить соблюдение заданных сроков выполнения работ, а также снизить затраты и уменьшить риски.

На следующем этапе развития системы планируется разработка адаптивной p2p сети мульти-агентных планировщиков, функционирующих

в реальном времени и взаимодействующих друг с другом с помощью шины данных предприятия, в целях поддержки высокой производительности, масштабируемости, гибкости и надежности работы системы.

Предлагаемый подход может быть также эффективно использован для решения задач моделирования производственных процессов в реальном времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № ГК 07.524.12.4022.

### Литература

1. **Handbook** of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / J. Y.-T. Leung (ed.) // CRC Computer and Information Science Series. – Chapman & Hall, 2004. – 1120 p.
2. **Vos Stefan**. Meta-heuristics: The state of the Art. Local Search for Planning and Scheduling / A. Nareyek (ed.) // ECAI 2000 Workshop, Germany. Springer-Verlag, Oct. 2001. Vol. 2148. N 29. P. 1–23.
3. **Skobelev P. O.** Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Application // Proc. of 10th Intern. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011), France, 2011. Springer-Verlag, 2011. P. 5–14.
4. **Skobelev P.** Bio-Inspired Multi-Agent Technology for Industrial Applications, Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications / Faisal Alkhateeb, Eslam Al Maghayreh and Iyad Abu Doush (ed.). InTech, Austria, 2011. P. 495–522. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/bio-inspired-multi-agent-technology-for-industrial-applications> (дата обращения: 10.06.2013).

УДК 378.14 А 72

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНИЧЕСКОМ АВТОНОМНОМ ВУЗЕ

**Ю. А. Антохина,**

канд. экон. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматриваются отличительные черты автономного учреждения, основными из которых являются смысл, статус автономного вуза, доходы и порядок взаимоотношений с коммерческими структурами, а также риски смены статуса бюджетного вуза на автономный. Анализируется проблема обучения современного «инженера-управленца» в вузе. Предлагается новый механизм управления вузом на основе ситуационного управления проектами.

**Ключевые слова** — автономное учреждение, ситуационное управление проектами, качество образования, организационная структура вуза.

### Введение

На современном этапе развития высшей школы некоторые вузы получили статус автономного учреждения. Важно понять, какие новые возможности и перспективы открывает для вуза переход от бюджетного учреждения к автономному.

### Автономный вуз

Автономное учреждение характеризуют следующие отличительные черты.

1. *Смысл создания.* Образовательное учреждение наделяется самостоятельностью в принятии решений по всем вопросам в рамках своего устава в целях интеграции образования и науки.

2. *Статус.* Автономным вузом признается некоммерческая организация, созданная Российской Федерацией в целях выполнения работ и оказания услуг в сферах науки и образования в рамках полномочий органов государственной власти, предусмотренных законодательством РФ. Автономный вуз выполняет социально значимые функции, но в то же время наделяется гораздо более широкой, по сравнению с бюджетным, финансово-хозяйственной и имущественной самостоятельностью.

3. *Структура управления.* В существующую систему управления должен быть органично встроена такой орган, как наблюдательный совет, осуществляющий (с привлечением в его состав

общественности, представителей государства, трудового коллектива) контрольно-надзорные функции в сфере финансово-хозяйственной деятельности, имея на это определенные полномочия [1].

4. *Доходы и порядок взаимоотношений с коммерческими структурами.* Доходы автономного вуза остаются в его самостоятельном распоряжении, используются им для достижения целей, ради которых оно создано. Автономный вуз может открывать расчетные депозитные и кредитные счета в кредитных организациях.

В отличие от бюджетного учреждения, автономное не обязано осуществлять все операции с безналичными денежными средствами через лицевые счета Федерального казначейства, что способствует повышению мобильности финансовых потоков. Автономный университет вправе получать кредиты и займы у кредитных организаций и иных частных лиц, что является немаловажной предпосылкой к развитию взаимовыгодного сотрудничества с крупным бизнесом, который приобретает возможность вкладывать свои денежные средства непосредственно в университетские образовательные и научные проекты.

Изменив статус, вуз надежно защищен на трехлетний период государством, которое сохраняет объем финансирования на уровне бюджетного вуза.

Расширена и возможность вуза распоряжаться своим имуществом, так как многие вопросы согласовываются только с наблюдательным со-

ветом, что ускоряет решение. Это очень важно, особенно для технических вузов, реализующих программы в рамках научной деятельности.

5. *Риски.* Правовое регулирование статуса автономного учреждения в настоящий момент характеризуется рядом пробелов и противоречий, фактически отсутствует практика применения норм закона об автономных учреждениях. Существует риск утраты финансирования, заключающийся в том, что государство, по сути, предлагает автономным вузам попробовать себя «в самостоятельности», в конкурентной среде, при сохранении минимального финансирования по заказу учредителя.

6. *Перспективы смены статуса.* Несмотря на наличие обозначенных рисков в регулировании правового статуса, автономный вуз как идея, уже получившая законодательное закрепление, безусловно, перспективна. Необходимо использовать правовые возможности автономного учреждения и минимизировать риски.

### Ситуационное управление проектами

Сложившаяся обстановка в современном мире заставила университеты искать пути не только выживания в сложной ситуации, но и укрепления позиций и повышения эффективности деятельности университетов. Существующую многие годы традиционную схему организации деятельности университета и проектную схему организации следует рассматривать как статическую и динамическую составляющие общей системы управления автономным университетом, значимость которых меняется в зависимости от стабильности общества и экономики [2].

Необходимость обращения к ситуационному управлению образовательными, научными и коммерческими проектами автономного университета (СУПАУ) является одним из важнейших направлений перспективного развития вуза. Применяя метод СУПАУ, автономное учреждение «обречено» на повышение качества образования. Каждый проект будет мотивировать как научно-педагогические кадры вуза, так и студентов в решении образовательных и научных задач. Благодаря СУПАУ качество образовательных программ резко повышается.

Подход к управлению проектами университета на основе СУПАУ дает некоторое универсальное решение по организационным мероприятиям, которые необходимо выполнить при реализации конкретных видов образовательных программ по новому рыночному заказу бизнеса, промышленности, социальных организаций и т. п. [3].

Не секрет, что молодой специалист, только что окончивший вуз, пока еще не обладает опытом ра-

боты и владеет лишь теоретическими профессиональными знаниями. Поэтому первые лица компаний при приеме на работу выпускников вузов обращают внимание в первую очередь на системность мышления кандидата, его креативность, способность принимать решения и нести за них ответственность, амбициозность, самодостаточность, инициативность, восприимчивость к обучению, желание работать. Понятно, что уровень и качество знаний выпускника также учитываются, но представители промышленности и бизнеса прекрасно отдадут себе отчет в том, что в нового сотрудника необходимо вложить еще немало времени и денежных средств, прежде чем он начнет эффективно выполнять свою работу. Развитие навыков современного «инженера-управленца» является сегодня первоочередной задачей, особенно для технического вуза [4].

Для того чтобы бизнесу было интересно вкладывать финансовые средства в повышение качества образования по тем специальностям и направлениям, для которых еще не созданы лаборатории и базовые кафедры, в образовательный процесс необходимо привлекать специалистов с практическим опытом применения технологий проектного менеджмента. Безусловно, теоретическая подготовка необходима, но студент, получивший только теоретические знания, еще не специалист. Важно читать работы, написанные практиками, изучать современные стандарты, посещать практикумы и семинары, иными словами, стараться не отставать от реального бизнеса [5].

В высшем образовании ситуация осложняется отсутствием специалистов в области оптимального решения глобальных проблем современного постиндустриального мира.

Высвобождение индивидуальной инициативы, развитие лидерских качеств сотрудников, безусловно, порождает проблемы управления, поскольку каждый лидер имеет свое видение приоритетов и способов развития и желает адекватного его заслугам статуса в университете.

В проектно-ориентированном автономном университете в качестве таких идеологических регуляторов выступают миссия и стратегия развития вуза. В качестве организационных регуляторов выступают дополнительные коллегиальные органы управления — координационные советы проектов, во главе которых стоят руководители проектов [6].

При попытке решить задачи кадрового обеспечения при создании системы проектного управления вуз может столкнуться еще с двумя проблемами. Во-первых, трудно найти вне университетской среды специалистов, хорошо понимающих потребности научного и образовательного процесса. Во-вторых, высококлассные

специалисты оказываются слишком дорогими для вуза. На практике можно привлекать к работе в технологической подсистеме преподавателей университета. Преподавателю приходится делить свои рабочие часы уже не на две части (наука — учебный процесс), а на три, уделяя значительное время проблемам развития порученного ему участка технологической подсистемы. Символом такого университета является тройка: аудитория — лаборатория — офис. Его схема может быть представлена в виде трехмерной структуры, представляющей собой двухмерное операционное ядро, слитое с технологической подсистемой университета [7].

### Заключение

Проведенный анализ показывает, что при сохранении традиционной иерархической функциональной системы университета, обслуживающей «серийный» учебный процесс, в автономном вузе складываются многочисленные дополнительные структуры, обеспечивающие реализацию все увеличивающегося количества новых продуктов деятельности университета. Концепция проектно-ориентированного автономного университета, включающая в себя внедрение в вузе методов СУПАУ, приходит на смену административным, механистическим методам управления, чтобы соответствовать реалиям инновационного, динамично меняющегося общества, основанного на знаниях.

### Литература

1. Антохина Ю. А. и др. Методы и инструменты управления качеством проектов: монография. — СПб.: ГУАП, 2012. — 278 с.
2. Коршунов Г. И., Тисенко В. Н. Управление процессами и принятие решений. — СПб.: СПбГПУ, 2010. — 231 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9004-2009. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. <http://www.rusexpertiza.ru> (дата обращения: 04.12.2013).
4. Поспелов Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика. — М.: Наука, 1986. — 284 с.
5. Фурсенко А. А. Российское образование стремится к оптимуму // Качество образования. 2009. № 1–2. С. 3–4.
6. Оводенко А. А. Креативные технологии управления проектами университета. — СПб.: ГУАП, 2010. — 246 с.
7. Никитина Н. Ш., Валеев М. А., Щеглов П. Е. Управление качеством образования. Системный подход // Системы управления качеством: проектирование, организация, методология: материалы X симп. «Квалиметрия человека и образования: методология и практика». Кн. 4 / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Н. А. Селезневой и д-ра филос. и экон. наук А. И. Субетто/ Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. М., 2002. С. 17–29.

УДК 378.14 А 72

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СХЕМ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Ю. А. Антохина,**

канд. экон. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

*Рассматриваются новые схемы управления качеством образования для проектно-ориентированного вуза. Предлагается создание групп для выполнения проектов. Описывается несколько схем организации проектно-ориентированного университета с учетом его целей и миссии.*

**Ключевые слова** — проектно-ориентированный вуз, управление качеством образования, проектная группа.

### Введение

В эпоху реформ в системе образования высшему учебному заведению необходимо искать новые подходы к подготовке высококачественных работников, востребованных на специализированном рынке труда. Промышленные предприятия заинтересованы не переучивать или доучивать инженеров, а сразу внедрять их в производственный процесс как на уровне исполнителей, так и на уровне руководителей. Для этого вузу предстоит развиваться во времени вместе с промышленностью и индустрией. Качество выпускаемых специалистов высшей школы сегодня не достаточно, чтобы удовлетворить потребности бизнеса. Вузу необходимо менять систему управления, применять новые методы преподавания предмета, повышать качество образования и управлять им, внедрять ситуационное управление проектами. Для повышения управления качеством образования вуз должен стать проектно-ориентированным [1].

### Основные понятия и организационные схемы проектно-ориентированного вуза

Цель создания нового принципа обучения состоит в реализации продукта (набора продуктов) деятельности университета. Главной организационной подструктурой проектно-ориентированного университета, реализующей конкретный проект, является полуавтономная группа сотрудников университета, которая называется институтом: институт качества образования, институт образовательных программ, институт

АИС и т. д. Термин «полуавтономная» означает, что группа действует, руководствуясь принципами ситуационного управления в рамках миссии, стратегического плана и устава университета, общих процедур финансового менеджмента в университете. В зависимости от сложности решаемых задач и продолжительности их решения проектные группы могут иметь ту или иную степень структурированности и различный статус внутри университета [2].

Институт может выполнять несколько проектов, соответствующих его назначению. Если проект рассчитан на взаимодействие с внешними организациями, например, со структурами бизнеса или органами местной власти, и способствует решению задач регионального характера, то институт может именоваться региональным [3].

В качестве одной из схем в проектно-ориентированном вузе может существовать виртуальная организация. Этот метод является одним из современных организационных инноваций. Идея виртуальной организации состоит в том, что при современных информационных технологиях нет необходимости собирать сотрудников в одном месте и тратить большие средства на штаб-квартиру корпорации. Контакты и обмен информацией могут осуществляться на основе сетевых компьютерных технологий. Конкретный случай организации проектной группы в университете является удачным приложением идеи виртуальной организации. В университете просто нет возможности отводить специальное помещение для каждой создаваемой проектной группы.

Несмотря на ограниченность во времени и рисковый характер каждого проекта, некото-

рые проектные структуры могут существовать продолжительное время и не иметь заранее определенного срока прекращения работы. Это структуры, которые созданы, условно говоря, для серийного выполнения проектов. Они основываются на постоянно пополняющейся группе различных проектных работ. Таким образом, хотя отдельный рисковый проект представляет собой неустойчивую во времени структуру исполнения, динамически меняющаяся комбинация проектов может обеспечить устойчивость проектной структуры, созданной для ее исполнения. Такая проектная структура динамически устойчива. Динамическая устойчивость проектной структуры обеспечивается постоянной целенаправленной работой по иницированию новых проектов, продлению старых проектов, мониторингу внешней среды и другими необходимыми действиями поддержания «рабочей смеси» проектов [4].

Концепция проектно-ориентированного университета основывается на гипотезе его динамической устойчивости как проектной структуры. Вместе с тем сохранение внутри проектно-ориентированной модели традиционной структуры выполнения серийных образовательных программ и научной деятельности гарантирует его нормальное функционирование при любых условиях внешней среды.

Целью проектно-ориентированного университета является интенсификация использования уже имеющихся человеческих ресурсов с соответствующим их материальным поощрением, а не экстенсивный рост. Подбор сотрудников в проектную группу производится в соответствии с принципом обеспечения наиболее эффективного исполнения работ.

Серьезной проблемой создания проектно-ориентированного университета является формирование такой организационной культуры, при которой руководители подразделений оценивают деятельность своих сотрудников только по результатам их работы и умеют договариваться между собой о совместном использовании кадров. Коллекциальным органом управления проектом, обеспечивающим функционирование горизонтальных связей, является координационный совет по проектам института. Координационный совет решает задачи по мере их возникновения и не должен собираться на заседания на некоторой регулярной основе. От руководителя проектной

группы зависят взаимоотношения сотрудников, оперативность и результативность выполняемых проектов [5].

### Заключение

Проектно-ориентированный вуз имеет более высокую степень объединения науки и образования. Применение системы перераспределения труда в вузе через внедрение и управление проектами повышает качество образовательных услуг и дает возможность на практике опробовать научные теоретические знания. Предлагаемые схемы проектно-ориентированного вуза обладают следующими преимуществами по сравнению с традиционно управляемым университетом:

- автономные подгруппы имеют высокую степень самостоятельности в выборе методов решения поставленных задач;
- контроль деятельности проводится не на основе оценки процесса, а по результатам работы;
- распределение заработанных денежных средств является прерогативой руководителя группы в рамках оговоренной схемы разделения средств с университетом.

### Литература

1. **Фурсенко А. А.** Российское образование стремится к оптимуму // *Качество образования*. 2009. № 1–2. С. 3–4.
2. **Антохина Ю. А.** и др. *Методы и инструменты управления качеством проектов: монография*. – СПб.: ГУАП, 2012. – 278 с.
3. **Нортон Р., Каплан Д.** *Стратегическое единство*. М.: Вильямс, 2006. – 374 с.
4. **ГОСТ Р ИСО 9004-2009.** Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. <http://www.rusexpertiza.ru> (дата обращения: 04.12.2013).
5. **Общие положения** по разработке образовательных программ и итоговая государственная аттестация выпускников: Сб. организационно-методических материалов по реализации образовательных программ высшего профессионального образования ГУАП / Сост. В. П. Ларин, А. В. Павлова, А. П. Ястребов / ГУАП. – СПб., 1999. – 22 с.

**АНТОХИНА**  
Юлия  
Анатольевна



Доцент кафедры инноватики и управления качеством, проректор по стратегическому планированию и управлению Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1999 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиотехника». В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Является автором 37 научных публикаций, включая три монографии. Область научных интересов — ситуационное управление проектами.  
Эл. адрес: antokhina.j@yandex.ru

**БАРДОВ**  
Владимир  
Михайлович



Аспирант кафедры систем управления и информатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2011 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по специальности «Автоматизация и управление». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — интеллектуальные транспортные системы, оценка параметров транспортных средств, управление дорожным движением.  
Эл. адрес: vladimir.bardov@gmail.com

**БОГАЧЕНКО**  
Надежда  
Федоровна



Доцент кафедры информационной безопасности Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского. В 1997 году окончила Омский государственный университет по специальности «Прикладная математика». В 2000 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 50 научных публикаций. Область научных интересов — модели безопасности компьютерных систем, прикладное программирование.  
Эл. адрес: nfbogachenko@mail.ru

**БАЛОНИН**  
Николай  
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 80 научных публикаций, в том числе трех монографий. Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книги с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети.  
Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

**БЕЛИМ**  
Сергей  
Викторович



Профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского. В 1996 году окончил Омский государственный университет по специальности «Физика». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором 117 научных публикаций. Область научных интересов — модели безопасности компьютерных систем, интеллектуальные системы защиты информации.  
Эл. адрес: sbelim@mail.ru

**БУКАНОВ**  
Федор  
Федорович



Профессор, заведующий кафедрой электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1968 году окончил Куйбышевский политехнический институт им. В. В. Куйбышева по специальности «Информационно-измерительная техника». В 1974 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 140 научных публикаций и пяти авторских свидетельств на изобретение. Область научных интересов — искусственный интеллект, информационно-измерительные системы, информационная безопасность.  
Эл. адрес: rts@samgtu.ru

**БУРАКОВ**  
Вадим  
Витальевич



Профессор кафедры компьютерной математики и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1996 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Вычислительные системы, комплексы и сети» с квалификацией «Инженер-исследователь».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов — программная инженерия, качество программ.

Эл. адрес: burakov@guar.ru

**ГОЛОВАНОВ**  
Александр  
Евгеньевич



Ведущий инженер-программист департамента «Информационные технологии в медицине» НПК «Маджента Девелопмент», г. Самара.

В 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет) по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Область научных интересов — компьютерная симуляция физики мягких и твердых тел, компьютерная графика.

Эл. адрес:

golovanov@magenta-technology.ru

**ГОРОДЕЦКИЙ**  
Андрей  
Емельянович



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники.

В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

Эл. адрес:

gorodetsky@mail23.ipme.ru

**ГОРСКИЙ**  
Олег  
Владимирович



Аспирант научно-исследовательского отдела биотехнических проблем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы».

Является автором семи научных публикаций.

Область научных интересов — бесконтактная передача энергии, имплантируемые системы, медицинское приборостроение.

Эл. адрес: gorskijoleg@gmail.com

**ЗАЙЦЕВ**  
Дмитрий  
Юрьевич



Ведущий инженер-конструктор департамента «Информационные технологии в медицине» НПК «Маджента Девелопмент», г. Самара.

В 2004 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет) по специальности «Двигатели летательных аппаратов».

Область научных интересов — мехатроника.

Эл. адрес:

zaitcev@magenta-technology.ru

**ИВАЩЕНКО**  
Антон  
Владимирович



Заместитель директора по науке НПК «Маджента Девелопмент», доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева (национального исследовательского университета).

В 2003 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — интеллектуальные системы управления, интеграция информационных ресурсов, мульти-агентные системы, информационные технологии в медицине.

Эл. адрес:

ivashenko@magenta-technology.ru

**КОЖЕВНИКОВ**  
**Сергей**  
**Сергеевич**



Директор аналитического центра ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара.  
В 2009 году окончил специалитет Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева по специальности «Информационные технологии в авиа- и ракетостроении», в 2010 году — магистратуру по специальности «Авиа- и ракетостроение». Является автором 17 научных публикаций.  
Область научных интересов — мультиагентные технологии, решение сложных задач в области управления и планирования ресурсов предприятий, бизнес и системная аналитика.  
Эл. адрес: koz@smartsolutions-123.ru

**КОЛСАНОВ**  
**Александр**  
**Владимирович**



Профессор, заместитель проректора Самарского государственного медицинского университета, заведующий кафедрой оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий.  
В 1997 году окончил Самарский государственный медицинский университет по специальности «Лечебное дело». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора медицинских наук. Является автором более 200 научных публикаций, в том числе двух монографий, 12 патентов на изобретения и авторских свидетельств, 25 рационализаторских предложений.  
Область научных интересов — хирургия, инновационные и информационные технологии в медицине.  
Эл. адрес: avkolsanov@mail.ru

**КУЗЬМИН**  
**Андрей**  
**Викторович**



Доцент кафедры теоретической и прикладной механики Пензенского государственного университета, ведущий программист НПК «Маджента Девелопмент», г. Самара.  
В 2004 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Информационные системы в экономике». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 70 научных публикаций и семи патентов на изобретения.  
Область научных интересов — геометрическое моделирование, компьютерная графика, медицинские информационные и диагностические системы.  
Эл. адрес: flickerlight@inbox.ru

**КОЛБАНЕВ**  
**Михаил**  
**Олегович**



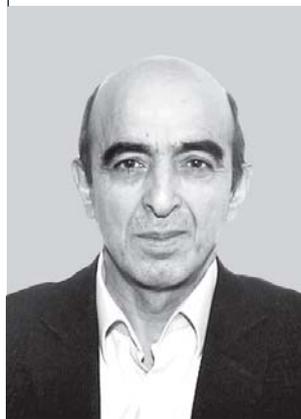
Профессор кафедры прикладных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики. Мастер связи.  
В 1977 году окончил Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Автоматическая электросвязь». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.  
Область научных интересов — моделирование информационных систем.  
Эл. адрес: mokolbanev@mail.ru

**КОЛЬБОВА**  
**Элина**  
**Владимировна**



Ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Автоматизированные системы управления». Является автором восьми научных публикаций.  
Область научных интересов — мультиагентные системы для решения сложных задач в управлении ресурсами предприятий, онтологическое представление знаний.  
Эл. адрес: kolbova@smartsolutions-123.ru

**КУРБАНОВ**  
**Вугар**  
**Гариб оглы**



Старший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург.  
В 1976 году окончил Азербайджанский государственный университет им. С. М. Кирова по специальности «Прикладная математика». В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 50 научных публикаций.  
Область научных интересов — математическое моделирование процессов управления, методы логического анализа систем, логико-вероятностные методы.  
Эл. адрес: vugar\_borchali@yahoo.com

**МАЙОРОВ**  
**Игорь**  
**Владимирович**



Ведущий специалист научно-исследовательского отдела научно-исследовательской группы лаборатории интеллектуальных технологий ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара. В 1988 году окончил Куйбышевский государственный университет по специальности «Теоретическая физика». Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — мультиагентные системы, искусственный интеллект, системы планирования в реальном времени, методы оптимизации. Эл. адрес: imayorov@smartsolutions123.ru

**МОНДИКОВА**  
**Яна**  
**Александровна**



Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2013 году окончила Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Компьютерная безопасность». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — криптография, алгоритмы шифрования, протоколы электронной цифровой подписи, схемы открытого распределения ключей, компьютерная безопасность. Эл. адрес: mondikovay@gmail.com

**ОБЕРТОВ**  
**Дмитрий**  
**Евгеньевич**



Аспирант кафедры систем управления и информатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2011 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по специальности «Автоматизация и управление». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — пьезоэлектрические приводы, интеллектуальные транспортные системы, идентификация классов транспортных средств. Эл. адрес: dimondking@mail.ru

**МОЛДОВЯН**  
**Николай**  
**Андреевич**



Профессор, заведующий научно-исследовательским отделом проблем информационной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, заслуженный изобретатель РФ. В 1975 году окончил Кишиневский политехнический институт по специальности «Полупроводниковые приборы». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций и 60 патентов на изобретения. Область научных интересов — информационная безопасность, криптография, электронная цифровая подпись, блочные шифры. Эл. адрес: nmold@mail.ru

**МОРОЗОВА**  
**Елена**  
**Владимировна**



Ученый секретарь НТС НИИ «Вектор», г. Санкт-Петербург. В 2001 году окончила Санкт-Петербургский университет водных коммуникаций по специальности «Информационные системы на транспорте». В 2004 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций. Область научных интересов — информационная безопасность, криптография. Эл. адрес: lenmor@mail.ru

**ПОДОПЛЕКИН**  
**Юрий**  
**Федорович**



Первый заместитель генерального директора ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург, член ряда академий, заслуженный деятель науки РФ, профессор. В 1962 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Конструирование и технологии производства радиоаппаратуры». В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 300 научных публикаций, в том числе около 150 патентов на изобретения. Область научных интересов — разработка сложных комплексов управления подвижными объектами и др. Эл. адрес: crigranit@peterlink.ru

**САФРОНОВ  
Сергей  
Геннадьевич**



Ведущий инженер ГУ Банка России по Самарской области, аспирант кафедры электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета.

В 1986 году окончил Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «Конструирование и производство РЭА».

Является автором восьми научных публикаций и одного авторского свидетельства на изобретение.

Область научных интересов — информационно-измерительные системы, компьютерная обработка изображений, защита информации.

Эл. адрес: 2012safr@mail.ru

**СЕРГЕЕВ  
Михаил  
Борисович**



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, директор НИИ информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1980 году окончил «ЛЭТИ».

В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, оптико-информационные системы.

Эл. адрес: mbse@mail.ru

**СКОБЕЛЕВ  
Петр  
Олегович**



Ведущий научный сотрудник Института проблем управления сложными системами РАН, профессор кафедры инженерии знаний Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара. В 1983 году окончил Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «АСУ и прикладная математика».

В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 150 научных публикаций и трех патентов на изобретения.

Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени и др.

Эл. адрес: petr.skobelev@gmail.com

**СБРОДОВ  
Владимир  
Васильевич**



Доцент кафедры электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета.

В 1969 году окончил Куйбышевский политехнический институт им. В. В. Куйбышева по специальности «Информационно-измерительная техника».

В 1979 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 120 научных публикаций и 53 авторских свидетельств и патентов на изобретение.

Область научных интересов — информационно-измерительные системы, компьютерная обработка изображений, управление, навигация.

Эл. адрес: vvsbrodov@yandex.ru

**СИМОНОВА  
Елена  
Витальевна**



Ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения», доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева (национального исследовательского университета).

В 1985 году окончила Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «Автоматизированные системы управления».

В 1994 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — разработка интеллектуальных систем управления мобильными ресурсами на основе мультиагентных технологий и др.

Эл. адрес: simonova.elena.v@gmail.com

**СОВЕТОВ  
Борис  
Яковлевич**



Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», заслуженный деятель науки и техники РФ, действительный член Российской академии образования.

В 1960 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1974 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 400 научных публикаций.

Область научных интересов — теория и практика информационных систем и технологий.

Эл. адрес: bysovetov@mail.ru

**ТАРАСОВ**  
Сергей  
Витальевич



Ведущий инженер исследований и разработки компании «Bel Air Informatique», Франция. В 1996 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Вычислительные системы, комплексы и сети» с квалификацией «Инженер-исследователь». Является автором 15 научных публикаций, включая одну монографию. Область научных интересов — СУБД, управляемая моделями разработка программного обеспечения. Эл. адрес: st@arbinada.com

**ТАРАСОВА**  
Ирина  
Леонидовна



Доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург. В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматические системы управления». В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика. Эл. адрес: til@msa2.ipme.ru

**ТАТАРНИКОВА**  
Татьяна  
Михайловна



Профессор кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1993 году окончила Восточно-Сибирский технологический институт по специальности «Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — инфокоммуникации, взаимодействие неоднородных сетей. Эл. адрес: tm-tatarn@yandex.ru

**ЦАРЕВ**  
Александр  
Вячеславович



Генеральный директор ООО «НПК «Разумные решения»», аспирант Института проблем управления сложными системами РАН, г. Самара. В 2001 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева по специальности «Физика». Является автором более 35 научных публикаций. Область научных интересов — мультиагентные системы для решения сложных задач в управлении ресурсами, онтологическое представление знаний, искусственный интеллект. Эл. адрес: at@anarun.net

**ЧЕРЕПАНОВ**  
Алексей  
Сергеевич



Ведущий инженер-программист департамента «Информационные технологии в медицине» НПК «Маджента Девелопмент», г. Самара. В 2007 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет) по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — вычислительная физика, компьютерная графика. Эл. адрес: cherepanov@magenta-technology.ru

**ШАРОВ**  
Сергей  
Николаевич



Профессор, главный научный сотрудник ОАО «Концерн «Гранит-Электрон», г. Санкт-Петербург, член-корреспондент Академии электротехнических наук Российской Федерации, Российской академии ракетных и артиллерийских наук. В 1962 году окончил приборостроительный факультет Ленинградского механического института по специальности «Системы автоматического управления». В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций, в том числе 13 книг и 130 изобретений. Область научных интересов — нелинейные системы управления, информационные каналы беспилотных летательных и космических аппаратов. Эл. адрес: cri-granit@peterlink.ru

**ШЕПИЛОВ**  
Ярослав  
Юрьевич



Ведущий разработчик ООО «НПК «Разумные решения», г. Самара. В 2012 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Автоматизированные системы управления».

Является автором восьми научных публикаций.

Область научных интересов — мультиагентные системы для решения сложных задач в управлении ресурсами предприятий, онтологическое представление знаний.

Эл. адрес:  
shepilov@smartsolutions-123.ru

**ЭЮБОВА**  
Наргиз  
Идаят кызы



Преподаватель, заведующая учебной частью кафедры физики, математики и информатики Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени акад. И. П. Павлова, аспирант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2009 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Прикладная информатика в экономике».

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — интеллектуальный анализ данных, современные методы статистической обработки медицинских данных.

Эл. адрес:  
nargiz.eubova@spb-gmu.ru

**ШПИЛЕВОЙ**  
Виктор  
Филиппович



Заместитель исполнительного директора по экономике и финансам предприятия авиационного и космического двигателестроения ОАО «Кузнецов», г. Самара.

В 1976 году окончил Московский авиационный институт по специальности «Инженер электромеханик», в 1985 году — Военную инженерную академию по специальности «Инженерная оперативно-тактическая», в 1997 году — Экономическую академию им. Г. В. Плеханова по специальности «Финансовый менеджмент».

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — организация управления сложными техническими и производственно-экономическими системами, разработка систем производственно-экономического управления.

Эл. адрес: vshpilevoy@yandex.ru

**ЮНУСОВ**  
Ренат  
Рафатович



Доцент, заведующий учебной частью кафедры оперативной хирургии и клинической анатомии с курсом инновационных технологий Самарского государственного медицинского университета. В 1981 году окончил Куйбышевский государственный медицинский университет им. Д. И. Ульянова по специальности «Лечебное дело».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук.

Является автором 43 научных публикаций, пяти учебно-методических работ и трех рационализаторских предложений.

Область научных интересов — хирургия, морфология, информационные технологии в медицине.

Эл. адрес:  
r.r.yunusov@samsmu.net

УДК 519.61:511-33

Матрица золотого сечения  $G_{10}$ *Балонин Н. А., Сергеев М. Б.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 2–5.

Рассматриваются модульно двухуровневые матрицы, дополняющие матрицы Мерсенна и Эйлера. Дано определение слоя матриц. На примере непрерывных матриц с варьируемыми уровнями показано, что ветвь матриц золотого сечения тесно связана с матрицами Белевича и Адамара, для нахождения которых матрицы золотого сечения могут быть использованы. Комментируются прикладные аспекты использования матриц золотого сечения.

*Ключевые слова* — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, матрицы Мерсенна, матрицы Эйлера, золотое сечение, матрица  $G_{10}$ .

Список лит.: 14 назв.

UDC 519.61:511-33

Matrix of Golden Ratio  $G_{10}$ *Balotin N. A., Sergeev M. B.* IUS, 2013. N 6. P. 2–5.

There have been considered two-level complementary Mersenne and Euler Matrices. Matrix layer definition has been given. Presenting the example of a continuous matrix with variable levels it has been shown that a branch of matrices of golden ratio is closely linked with Hadamard and Belevich Matrices to define which golden ratio matrices can be used. There have been commented applied aspects of using matrices of golden matrices.

*Keywords* — Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Belevich Matrices, Mersenne Matrices, Euler Matrices, Golden Ratio,  $G_{10}$  Matrix

Refs: 14 titles.

УДК 004.93 + 62.51 + 625.03

Алгоритм обнаружения транспортных средств с помощью акселерометров

*Обертов Д. Е., Бардов В. М.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 6–13.

Рассматриваются проблемы обнаружения транспортных средств с помощью акселерометров. Описан алгоритм для обнаружения транспортных средств и разделения во времени одного автомобиля от другого. Приведены результаты обработки данных с помощью алгоритма и показана его эффективность.

*Ключевые слова* — акселерометр, обнаружение, транспортное средство, интеллектуальные транспортные системы. Список лит.: 28 назв.

UDC 004.93 + 62.51 + 625.03

The Algorithm of Vehicle Detection using Accelerometers

*Obertov D. E., Bardov V. M.* IUS, 2013. N 6. P. 6–13.

The problems of detecting vehicles using accelerometers have been considered. The algorithm of detection of vehicles and time separation of vehicles has been described. The results of data processing with a help of the algorithm which demonstrate its effectiveness have been given.

*Keywords* — Accelerometer, Detection of Vehicles, Calculation of Axles of Vehicles, Intelligent Transport Systems.

Refs: 28 titles.

УДК 623.746.07519

Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда

*Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 14–24.

Приводится обзор основных теоретических вопросов проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда. Рассматривается способ посадки беспилотных летательных аппаратов на кран-балку, выдвинутую за борт движущегося судна. Обсуждаются траектории их возврата на судно-носитель и особенности приведения его на зацеп кран-балки. Показаны способы управления посадкой в условиях качки судна.

*Ключевые слова* — беспилотный летательный аппарат, информационно-управляющая система, судно.

Список лит.: 19 назв.

UDC 623.746.07519

Key Aspects of Theory and Design of Landing Systems of UFV on Small Vessels

*Podoplekin Yu. F., Sharov S. N.* IUS, 2013. N 6. P. 14–24.

The basic theoretical design aspects of landing systems of UFV on small vessels have been overviewed. A method of landing of unmanned aerial vehicles on the overboard embarking davit of vessels in motion has been introduced. There have been considered return paths of UFV on board of a carrier-vessel as well as features of their catching on the davit of a vessel in motion. The methods of landing system control in pitch and roll conditions have been shown.

*Keywords* — UFV, Information and Control System, Vessel.

Refs: 19 titles.

## УДК 004.75

Оценка вероятности эрланговского старения информации  
*Советов В. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 25–28.

Рассматривается процесс предоставления информационной услуги, который регламентируется соглашениями о качестве обслуживания. Предлагается процедура вычисления вероятности своевременной обработки запроса пользователя как одной из основных характеристик качества обслуживания. Приводится методика оценки вероятности своевременного предоставления информационных услуг центрами обработки данных. Показано, что искомая вероятность может быть вычислена, если преобразование Лапласа–Стилтьеса функции распределения времени обработки запроса пользователя представляет собой произведение или частное двух функций, является суперпозицией двух функций или задано неявно.

**Ключевые слова** — качество обслуживания клиента, информационная услуга, показатели качества предоставления услуг, центр обработки данных, вероятность своевременного предоставления информационной услуги.

Список лит.: 5 назв.

## УДК 681.5

Эргатические методы анализа процессов эксплуатации и принятия решений при повреждениях и авариях энергообъектов

*Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 29–36.

Предлагаются математически обоснованные и опробованные на практике методы анализа и принятия решения при эксплуатации энергосистемы в экстремальных условиях. При этом в первую очередь решены проблемы моделирования аварийных ситуаций и быстрого анализа большого объема количественной и качественной информации в условиях неполной определенности. Рассматриваются логико-вероятностные и логико-лингвистические методы, позволяющие обосновывать принятия решений на основе нечеткой модели деградации энергосистемы в процессе эксплуатации. Все они доведены до алгоритмов, готовых для программирования на ЭВМ.

**Ключевые слова** — принятие решения, эргатическая система, логико-вероятностная модель, логико-лингвистическая модель.

Список лит.: 16 назв.

## УДК 004.94:681.518.3

Компьютерное моделирование и полунатурные испытания оптико-электронных систем на автоматизированных стендах

*Буканов Ф. Ф., Сбродов В. В., Сафронов С. Г.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 37–47.

Приводятся описание стендового оборудования, методика, результаты компьютерного моделирования и полунатурных испытаний оптико-электронных систем для комплексов дистанционного мониторинга и навигации подвижных объектов. При создании стендов ставилась основная задача — достижение высокой точности стендового оборудования, дающей возможность определить предельные параметры разрабатываемых систем. Показано, что экспериментальная стендовая отработка пассивных оптико-электронных космических систем наблюдения поверхности Земли позволяет оценивать их характеристики в диапазоне изменений внешних условий эксплуатации до проведения конструкторско-доводочных испытаний.

**Ключевые слова** — компьютерное моделирование, полунатурные испытания, оптико-электронная система, система технического зрения, обработка изображений, распознавание, корреляционно-экстремальная система.

Список лит.: 15 назв.

## UDC 004.75

Evaluation of Probability of Erlang Information Aging  
*Sovetov V. Ya., Kolbanev M. O., Tatarnikova T. M.* IUS, 2013. N 6. P. 25–28.

There has been analyzed the process of providing an information service which is regulated by agreements on quality of service. There has been proposed a procedure of calculating probability of timely processing of a user's request as one of the main characteristics of service quality. There have been given methods for evaluating probability of timely rendering of information services by data processing centers. It is shown that the required probability can be calculated if transformation of Laplace Stieltjes function of user request processing time distribution is a product or a quotient of two functions, or it is a superposition of two functions, or it is implicitly specified.

**Keywords** — Quality of Customer Service, Information Service, Quality Indicators of Service, Data Processing Center, Probability of Timely Rendering of Information Services, Method of Calculating Probability of Aging Information.

Refs: 5 titles.

## UDC 681.5

Ergatic Methods of Analysis of Exploitation Processes and Decision-Making in Case of Damage and Accidents of Power Facilities

*Gorodetsky A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L.* IUS, 2013. N 6. P. 29–36.

There have been proposed mathematically substantiated and practically tested methods of analysis and decision making during operation of a power system in extreme conditions. Firstly there have been solved the problems of modeling emergencies and rapid analysis of large amounts of quantitative and qualitative information in conditions of incomplete certainty. There have been considered logical-probabilistic and logical-linguistic methods allowing to justify decision making based on a fuzzy model of degradation of an energy system during its operation. All methods have been developed into algorithms ready for computer programming.

**Keywords** — Decision Making, Ergatic System, Logical-Probabilistic Model, Logical-Linguistic Model.

Refs: 16 titles.

## UDC 004.94:681.518.3

Computer Simulation and Semi-Field Tests of Optical-Electronic Systems Using Automated Test Benches

*Bukanov F. F., Sbrodov V. V., Safronov S. G.* IUS, 2013. N 6. P. 37–47.

There has been given a description of test bench equipment, methodology, results of computer simulation and semi-field testing of optical-electronic systems for remote monitoring systems and navigation of mobile objects. When creating test benches the main task was to achieve high accuracy of test bench equipment allowing to determine limit parameters of the systems being developed. It is shown that the experimental bench testing of passive optical-electronic outer space systems of monitoring the Earth surface allows to evaluate their performance in a range of changes of external operation conditions prior to design and testing.

**Keywords** — Computer Simulation, Semi-Field Tests, Optical Electronic System, Technical Vision System, Image Processing, Recognition, Correlation-Extreme System.

Refs: 15 titles.

УДК 616-71

Исследование базовой модели индуктивно связанных контуров бесконтактного зарядного устройства имплантируемых систем

*Горский О. В.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 48–57.

Рассматривается один из способов энергообеспечения имплантируемых систем при помощи бесконтактной передачи энергии, накапливаемой в аккумуляторе. На основании реализованного макета системы индуктивной зарядки производится уточнение модели взаимодействия передающего и приемного контуров. Адекватность модели проверяется по результатам стендового эксперимента в средах воздуха и водно-солевого раствора. Приводится классификация данных, задействованных на различных этапах исследования системы.

*Ключевые слова* — бесконтактная передача энергии, имплантируемая система, моделирование электромагнитного поля.

Список лит.: 17 назв.

УДК 004.05

Способы реляционного моделирования иерархических структур данных

*Тарасов С. В., Бураков В. В.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 58–66.

Данные различных предметных областей часто имеют связи иерархического характера. Наиболее надежным способом хранения информации до сих пор являются реляционные базы данных. Реляционный способ моделирования в чистом виде не поддерживает иерархические типы данных. Распространённость иерархических структур в задачах автоматизации обосновывает актуальность поиска способов эффективного отображения древовидных данных в реляционную модель. В статье рассматриваются способы представления структур иерархического типа в реляционных базах данных и типовые запросы к этим структурам хранения. Описаны критерии количественной оценки способов хранения и их сравнительные характеристики.

*Ключевые слова* — иерархические структуры данных, реляционные базы данных.

Список лит.: 10 назв.

УДК 004.056

Применение метода анализа иерархий для оценки рисков утечки полномочий в системах с ролевым разграничением доступа

*Белим С. В., Богаченко Н. Ф.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 67–72.

Исследуется вопрос наличия у пользователей избыточных полномочий в компьютерных системах с ролевым разграничением доступа. Для оценки рисков утечки полномочий применяется метод анализа иерархий. Метод основывается на иерархической структуре множества ролей. Дается оценка трудоемкости предложенного алгоритма. Показано, что предложенная методика позволяет ранжировать определенные в системе полномочия по величине рисков их утечки. При этом все расчеты ведутся, исходя из особенностей построения самой системы, без привлечения механизма экспертных оценок. Связь метода анализа иерархий и ролевого дерева системы разграничения доступа дает возможность получить дополнительную информацию в ситуации, когда альтернативные решения не удается описать какими-либо точными функциональными зависимостями, а также избавляет метод от несогласованности и субъективизма суждений экспертов.

*Ключевые слова* — ролевое разграничение доступа, утечка полномочий, метод анализа иерархий, трудоемкость алгоритма.

Список лит.: 20 назв.

UDC 616-71

Research on a Basic Model of Inductively Coupled Coils in a Charging System for Implanted Systems

*Gorskiy O. V.* IUS, 2013. N 6. P. 48–57.

There has been considered a method of power supply to implanted systems using contactless transmission of energy accumulated in a battery. Based on the implemented inductive charging system breadboard there has been specified a model of interaction of transmitter and receiver inductive coils. Adequacy of the model is being checked according to the results of a bench test in air and isotonic saline media. There has been presented a classification of data used at various stages of the system study.

*Keywords* — Contactless Power Transmission, Implanted System, Modeling of Electromagnetic Fields.

Refs: 17 titles.

UDC 004.05

Methods of Relational Modeling of Hierarchical Structures of Data

*Tarasov S. V., Burakov V. V.* IUS, 2013. N 6. P. 58–66.

Data of various subject domains often have hierarchical relations. Relational databases are the most reliable way of information storage so far. The relational way of modeling per se does not support hierarchical types of data. Prevalence of hierarchical structures in problems of automation substantiates relevance for searching ways of effective display of treelike data in a relational model. The paper considers methods of representation of hierarchical structures in relational databases as well as standard requests to these storage structures. There have been described criteria of quantitative assessment of storage methods and their comparative characteristics.

*Keywords* — Hierarchical Data Structures, Relational Databases.

Refs: 10 titles.

UDC 004.056

Using a Hierarchy Analysis Method to Assess Permission Leakage Risks in Systems with a Role Based Access Control

*Belim S. V., Bogachenko N. F.* IUS, 2013. N 6. P. 67–72.

There has been studied an issue of users' excessive permissions in computer systems with a role based access control. A hierarchy analysis method is used to assess permission leakage risks. The method is based on a hierarchal structure of a role set. There has been presented evaluation of complexity of the proposed algorithm. There has been demonstrated that the proposed technique makes it possible to rank permissions defined by the system according to their leakage risks. All calculations are performed based on particularities of a system structure without involving a mechanism of expert evaluations. Connection of the hierarchy analysis method and the role tree allows to obtain additional information in a situation when alternative solutions cannot be described by any precise functional dependencies and prevents inconsistencies and subjectivity of experts judgments.

*Keywords* — Role Based Access Control, Permission Leakage, Hierarchy Analysis Method, Algorithm Complexity.

Refs: 20 titles.

## УДК 681.3

Способы отрицаемого шифрования с разделяемым ключом

*Морозова Е. В., Мондикова Я. А., Молдовян Н. А.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 73–78.

Предложены критерии построения алгоритмов отрицаемого шифрования для реализации механизмов защиты информации типа обманных ловушек и представлены разработанные алгоритмы данного типа. Новыми реализованными требованиями являются неотличимость от вероятностного шифрования и идентичность процедуры расшифрования и использования всех битов криптограммы для всех возможных значений ключа. Предложенные способы отрицаемого шифрования обеспечивают высокую производительность и перспективны для расширения арсенала криптографических механизмов защиты информации, используемых в комплексных системах компьютерной безопасности.

*Ключевые слова* — компьютерная безопасность, криптография, отрицаемое шифрование, хэш-функции, блочные шифры, вероятностное шифрование, криптограмма.

Список лит.: 14 назв.

## УДК 004.9

Моделирование разреза при симуляционном обучении базовым навыкам лапаротомии

*Колсанов А. В., Юнусов Р. Р., Иващенко А. В., Кузьмин А. В., Голованов А. Е., Черепанов А. С., Зайцев Д. Ю.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 79–84.

Описывается тренажер открытой хирургии, входящий в аппаратно-программный комплекс «Виртуальный хирург». Тренажер разработан с использованием современных технологий трехмерного моделирования и компьютерной графики и предназначен для моделирования оперативного вмешательства при системном обучении врачей-хирургов методам лапаротомии (разрезы брюшной стенки) с небольшим размером операционного поля на этапах додипломного и последипломного образования. Наибольшее внимание уделяется алгоритмам имитации разреза трехмерных объектов, представленных объемными примитивами.

*Ключевые слова* — трехмерное моделирование, хирургия, симуляционное обучение, разрез, тесселяция, геометрическая модель, ogre3d, physX.

Список лит.: 8 назв.

## УДК 629.735.33

Методы классификации в диагностике уролитиаза с применением нечеткой логики для предобработки данных

*Эюбова Н. И.* Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 85–90.

Рассматривается задача построения классификатора для диагностики уролитиаза с предварительной обработкой данных, включающей снижение размерности и применение нечеткого вывода. Классифицирующие правила выбираются из деревьев решений, фазифицируются и валидируются медицинским экспертом. Полученные результаты показывают, что предлагаемые методы предварительной обработки данных улучшают точность диагностики уролитиаза.

*Ключевые слова* — задача классификации, деревья решений, нечеткая логика, медицинская диагностика, уролитиаз.

Список лит.: 5 назв.

## UDC 681.3

Methods of Deniable Encryption with a Shared Key

*Morozova E. V., Mondikova Y. A., Moldovyan N. A.* IUS, 2013. N 6. P. 73–78.

There have been proposed criteria for constructing deniable encryption algorithms to implement mechanisms of protecting information such as fake catchers; the developed algorithms have been presented. New implemented requirements are the following: indistinguishability from probabilistic encryption, the same decryption procedure and use of all bits of a cryptogram for all possible values of a key. The proposed methods of deniable encryption provide high performance; they are prospective to expand a set of cryptographic data protection mechanisms used in complex computer security systems.

*Keywords* — Computer Security, Cryptography, Deniable Encryption, Hash Function, Block Ciphers, Probabilistic Encryption, Cryptogram.

Refs: 14 titles.

## UDC 004.9

Midline Incision Modeling for Basic Laparotomy Simulation Training

*Kolsanov A. V., Yunusov R. R., Ivaschenko A. V., Kuzmin A. V., Golovanov A. E., Cherepanov A. S., Zaitsev D. Yu.* IUS, 2013. N 6. P. 79–84.

There has been described an open surgery training simulator that is a part of the “Virtual Surgeon” hardware-software training complex. The training complex has been created using modern technologies of 3D simulation and computer graphics; it is designed for surgery simulation during systematic training of surgeons to perform laparotomy (open surgery) with small surgical incision at the stages of undergraduate and postgraduate education. The greatest attention is paid to emulation of incision of 3D objects represented by volumetric primitives.

*Keywords* — 3D Simulation, Surgery, Simulation Training, Incision, Tessellation, Geometrical Model, Ogre3D, PhysX.

Refs: 8 titles.

## UDC 629.735.33

Classification Methods in Diagnostics of Urolithiasis Using Fuzzy Logics for Data Preprocessing

*Eyubova N. I.* IUS, 2013. N 6. P. 85–90.

There has been considered a problem of classifier construction for diagnostics of urolithiasis with preliminary data processing including dimension reduction and fuzzy conclusion. Classification rules are selected from decision trees, they are fuzzified and validated by a medical expert. The achieved results have shown that the proposed methods of preliminary data processing improve accuracy of urolithiasis diagnostics.

*Keywords* — Problem of Classification, Decision Trees, Fuzzy Logics, Medical Diagnostics, Urolithiasis.

Refs: 5 titles.

УДК 005.8:615.478

Разработка мультиагентной системы «Smart Factory» для оперативного управления ресурсами в режиме реального времени

Шпилевой В. Ф., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Кожевников С. С., Кольбова Э. В., Майоров И. В., Шепилов Я. Ю. Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 91–98.

Описаны принципы разработки мультиагентной системы «Smart Factory», предназначенной для управления ресурсами производственных цехов машиностроительных предприятий в режиме реального времени. Мультиагентная технология обеспечивает возможность гибко реагировать на непредвиденные события, возникающие в условиях производственного процесса, что позволяет планировать, оптимизировать и контролировать работу персонала предприятий в реальном времени. Представлены разработанный метод адаптивного планирования ресурсов, основные функции, архитектура и интерфейс системы. Показано, что внедрение интеллектуальной системы «Smart Factory» дает возможность выполнить работу в заданные сроки, снизить затраты и уменьшить риски.

**Ключевые слова** — управление ресурсами, машиностроительное производство, мультиагентная технология, интеллектуальная система, оперативное планирование, режим реального времени.

Список лит.: 4 назв.

УДК 378.14 А 72

Управление качеством образования в техническом автономном вузе

Антохина Ю. А. Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 99–101.

Рассматриваются основные отличительные черты автономного учреждения, основными из которых являются смысл, статус автономного вуза, доходы и порядок взаимоотношений с коммерческими структурами, а также риски смены статуса бюджетного вуза на автономный. Рассматривается проблема обучения современного «инженера-управленца» в вузе. Предлагается новый механизм управления вузом на основе ситуационного управления проектами.

**Ключевые слова** — автономное учреждение, ситуационное управление проектами, качество образования, организационная структура вуза.

Список лит.: 7 назв.

УДК 378.14 А 72

Основные понятия организационных схем проектно-ориентированного университета

Антохина Ю. А. Информационно-управляющие системы, 2013. № 6. С. 102–103.

Рассматриваются новые схемы управления качеством образования для проектно-ориентированного вуза. Предлагается создание групп для выполнения проектов. Описывается несколько схем организации проектно-ориентированного университета с учетом его целей и миссии.

**Ключевые слова** — проектно-ориентированный вуз, управление качеством образования, проектная группа.

Список лит.: 5 назв.

UDC 005.8:615.478

Development of the Multi-Agent System “Smart Factory” for Operative Resource Management in Real Time

Shpilevoy V. F., Skobelev P. O., Simonova E. V., Tzarev A. V., Kozhevnikov S. S., Kolbova E. V., Mayorov I. V., Shepilov Ya. Yu. IUS, 2013. N 6. P. 91–98.

There have been described principles of development of the multi-agent system “Smart Factory” designed for real-time resource management of production departments of machine-building enterprises. The multi-agent technology provides flexible reaction to unexpected events occurring during manufacturing process that allows scheduling, optimizing and managing work of enterprises staff in real time. There has been presented a method of adaptive resource scheduling, the main functions, architecture and the system interface. It is shown that introduction of the intellectual system “Smart Factory” allows to perform work within the required deadlines, to decrease costs and risks.

**Keywords** — Resource Management, Machinery Production, Multi-Agent Technology, Intelligent System, Operational Scheduling, Real-Time.

Refs: 4 titles.

UDC 378.14 А 72

Management of Education Quality at an Autonomous Technical University

Antokhina Yu. A. IUS, 2013. N 6. P. 99–101.

There have been analyzed characteristic features of an autonomous educational establishment; the essence, a status of an autonomous university, expenditures and an order of interaction with commercial structures as well as risks of changing the budget status for the autonomous one have been considered to be the main features. The problem of training a modern engineer-manager at the university has been discussed. A new mechanism of the university management on the basis of situational project management has been proposed.

**Keywords** — Autonomous Higher Educational Establishment, Situational Project Management, Quality of Education, Organizational University Structure.

Refs: 7 titles.

UDC 378.14 А 72

Basic Concepts of Organizational Schemes for a Project-Oriented University

Antokhina Yu. A. IUS, 2013. N 6. P. 102–103.

There have been considered the new schemes of education quality management for a project-oriented university. Creation of groups for project implementation has been proposed. Several organizational schemes for a project-oriented university with account of its goals and mission have been described.

**Keywords** — Project-Oriented University, Education Quality Management, Project Group.

Refs: 5 titles.

# СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2013 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
Аваряскин Д. П., Белоконов И. В. Исследование проблемы безопасного полета наноспутников при их выведении на низкие орбиты	5	13
Акимцев В. В. Алгоритм разрешения неизвестного числа целей по дальности	2	67
Андреев Н. Д., Новиков Ф. А. Фабрики прикладного программного обеспечения, управляемые моделями предметных областей	3	47
Антохина Ю. А. Основные понятия организационных схем проектно-ориентированного университета	6	102
Антохина Ю. А. Управление качеством образования в техническом автономном вузе	6	99
Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков	2	89
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Взвешенная конференц-матрица, обобщающая матрицу Белевича на 22-м порядке	5	97
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара	5	2
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрица золотого сечения $G_{10}$	6	2
Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера	1	7
Бардов В. М., Обертов Д. Е. Оценивание скорости транспортных средств с использованием магнитометра	4	21
Белим С. В., Богаченко Н. Ф. Применение метода анализа иерархий для оценки рисков утечки полномочий в системах с ролевым разграничением доступа	6	67
Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б. Иерархия размещения фемто/пико/макросот в городской среде с плотным расположением абонентов, находящихся внутри и вне помещения	4	36
Бритов Г. С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем	2	75
Буканов Ф. Ф., Сбродов В. В., Сафронов С. Г. Компьютерное моделирование и полунатурные испытания оптоэлектронных систем на автоматизированных стендах	6	37
Бураченко Д. Л., Савищенко Н. В. Пропускная способность и предельная частотно-энергетическая эффективность в системах с двумерными сигналами М-КАМ, М-ФМ и М-АФМ	1	64
Ваганов М. А., Москалец О. Д., Кулаков С. В. Многоканальный спектральный прибор для диагностики жидкостного ракетного двигателя	1	2
Вершинина А. С., Кулаков С. В., Москалец О. Д. Поляризация преобразования зондирующих и отраженных сигналов радиочастотной идентификации	2	2
Волхонский В. В., Малышкин С. Л. К вопросу единства терминологии в задачах физической защиты объектов	5	61
Воронов М. В. Рецензия на монографию К. В. Григорьевой «Конфликтно-динамические системы. Часть 1: Статические и стохастические коалиционные игры»	4	94
Гордеев А. В., Балберин В. В. Концепция организации технологий виртуализации для использования в учебном процессе		
Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Имитационное моделирование развития аварийных ситуаций в энергетических установках	2	38
Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Эргатические методы анализа процессов эксплуатации и принятия решений при повреждениях и авариях энергообъектов	6	29
Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Зиняков В. Ю. Управление живучестью сложной системы на основе логико-вероятностного прогнозирования	5	80
Горский О. В. Исследование базовой модели индуктивно связанных контуров бесконтактного зарядного устройства имплантируемых систем	6	48
Григорьевых Е. А., Хафизов Р. Г. Формирование и обработка комплекснозначных последовательностей в многоканальных системах передачи информации	3	74
Губочкин И. В., Карпов Н. В. Кластеризация авторегрессионных моделей речевых сигналов по критерию минимума информационного рассогласования Кульбака — Лейблера	5	34
Демьянчук А. А., Мирин А. Ю., Молдовян Н. А. Типы и приложения протоколов с нулевым разглашением секрета	3	67
Демьянчук А. А., Молдовян Д. Н., Новикова Е. С., Гурьянов Д. Ю. Подход к построению криптосхем на основе нескольких вычислительно трудных задач	2	60
Дурнев Р. А., Лукьянович А. В., Котсонова А. С. Методический подход к обоснованию параметров текстовых сообщений для оповещения населения при чрезвычайных ситуациях	4	60
Зиняков В. Ю., Городецкий А. Е., Кучмин А. Ю., Зеленов Е. И., Алферова Н. В. Восстановление двумерных изображений с дефектами	3	8
Зяблов В. В., Кобозева И. Г. Оценка вероятности ошибочного декодирования обобщенных кодов с локализацией ошибок	1	47

	№	Стр.
<b>Караваев А. С., Кульминский Д. Д., Пономаренко В. И., Прохоров М. Д.</b> Система цифровой передачи информации, маскируемой хаотическим сигналом системы с запаздыванием	4	30
<b>Клейменова Е. М., Феоктистов А. Л., Скобелев П. О., Ларюхин В. Б., Майоров И. В., Симонова Е. В., Полончук Е. В.</b> Метод оценки рисков в мультиагентной системе управления проектами НИР и ОКР в реальном времени	2	29
<b>Ковцур М. М., Никитин В. Н., Винель А. В.</b> Исследование вероятностно-временных характеристик протокола распределения ключей защищенной IP-телефонии	1	54
<b>Колесников А. М., Сторощук А. Н.</b> Методы оптимального распределения ресурсов при реализации программ повышения устойчивости промышленного предприятия	5	93
<b>Колсанов А. В., Юнусов Р. Р., Иващенко А. В., Кузьмин А. В., Голованов А. Е., Черепанов А. С., Зайцев Д. Ю.</b> Моделирование разреза при симуляционном обучении базовым навыкам лапаротомии	6	79
<b>Комаров В. А., Гличенко А. С.</b> Исследование эффективности временного разделения многократных измерений в распределенных измерительно-управляющих системах	4	73
<b>Коршунов Г. И., Ли Шунь Минь.</b> Сокращение времени производственного цикла морской транспортировки нефти на основе внедрения методов менеджмента и технологических инноваций	5	86
<b>Коршунов Г. И., Поляков С. Л.</b> Сокращение времени производственного цикла на основе внедрения методов менеджмента и технологических инноваций	4	78
<b>Котенко И. В., Новикова Е. С.</b> Визуальный анализ защищенности компьютерных сетей	3	55
<b>Котенко И. В., Саенко И. Б.</b> Перспективные модели и методы защиты компьютерных сетей и обеспечения безопасности киберпространства: обзор международных конференции MMM-ACNS-2012 и семинара SA&PS4CS 2012	3	97
<b>Котликов Е. Н., Новикова Ю. А.</b> Программное обеспечение для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий		
<b>Красильников Н. Н.</b> Метод формирования 3D-изображения сцены по одной фотографии	3	2
<b>Крук Е. А., Сергеев М. Б.</b> О векторном квантовании изображений	3	93
<b>Кузнецов Л. А., Бугаков Д. А.</b> Разработка меры оценки информационного расстояния между графическими объектами	1	74
<b>Курилова О. Л.</b> Применение генетического алгоритма для оптимизации учебного плана	3	84
<b>Логинов И. В.</b> Оценивание ресурсоемкости реинжиниринга информатизированных бизнес-процессов	1	85
<b>Лукин М. А., Шалыто А. А.</b> Разработка и автоматическая верификация параллельных автоматных программ	5	43
<b>Максименко С. Л., Мелехин В. Ф.</b> Анализ надежности функциональных узлов цифровых СВИС со структурным резервированием и периодическим восстановлением работоспособного состояния	2	18
<b>Максименко С. Л., Мелехин В. Ф.</b> Анализ надежности цифровых устройств со структурным резервированием и периодическим восстановлением работоспособного состояния узлов	3	16
<b>Мальцев Г. Н., Вознюк В. В., Туктамышев М. Р.</b> Моделирование конфликта сложных радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов	5	26
<b>Мальцев Г. Н., Джумков В. В.</b> Обобщенная модель дискретного канала передачи информации с группированием ошибок	1	27
<b>Машевский Г. А., Юлдашев З. М.</b> Модель принятия решений при диагностике воспалительных процессов организма по виду интоксикации ионами $HS^-$ и $Fe^{2+}$	2	43
<b>Морозова Е. В., Мондикова Я. А., Молдовян Н. А.</b> Способы отрицаемого шифрования с разделяемым ключом	6	73
<b>Москалец О. Д.</b> Модели сигналов в радиополяриметрии	3	36
<b>Науменко В. В., Копытов В. В.</b> Решение задачи распределения ресурсов при выполнении административных регламентов	2	83
<b>Новиков Е. А.</b> Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS	3	78
<b>Обертов Д. Е., Бардов В. М.</b> Алгоритм обнаружения транспортных средств с помощью акселерометров	6	6
<b>Осипов В. Ю.</b> Рекуррентная нейронная сеть с двумя сигнальными системами	4	8
<b>Осипов В. Ю., Носаль И. А.</b> Обоснование мероприятий информационной безопасности	2	48
<b>Охотников С. А.</b> Алгоритм управления деревообрабатывающим станком на основе аппарата контурного анализа изображений	1	11
Памяти Турнецкого Леонида Сергеевича	4	96
<b>Петров И. О.</b> Метод оперативного решения нелинейных краевых задач динамики полета на основе энергетического принципа	1	34
<b>Пименов В. И.</b> Рецензия на монографию К. В. Григорьевой «Аппроксимация критериального функционала в задачах математической диагностики»	2	91
<b>Подоплёкин Ю. Ф., Шаров С. Н.</b> Ключевые вопросы теории и проектирования систем посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда	6	14
<b>Полончик О. Л.</b> Направления развития РЛС с синтезированной апертурой космического базирования	4	2
<b>Рогов А. А., Забровский А. Л.</b> Система моделирования сетевых помех мультимедийных потоков	3	42
<b>Русяк И. Г., Касаткина Е. В., Сайранов А. С.</b> Информационно-аналитическая система управления топливоснабжением региона альтернативными видами топлива	4	83

	№	Стр.
<b>Савищенко Н. В.</b> Помехоустойчивость когерентного разнесенного приема многопозиционных сигнальных конструкций при коррелированных релейских замираниях в каналах связи	4	48
<b>Савченко В. В., Савченко А. В.</b> Метод фонетического декодирования слов в информационной метрике Кульбака — Лейблера для систем автоматического анализа и распознавания речи с повышенным быстродействием	2	7
<b>Сербулов Ю. С., Глухов Д. А.</b> Математическое моделирование рыночной ситуации ресурсного взаимодействия производственно-экономических систем	4	27
<b>Скуратов В. В.</b> Матричное умножение над полем GF(2) в защите беспроводных каналов систем управления робототехническими комплексами	4	88
<b>Скшидлевский А. А.</b> Приложение для автоматизации процессов установки и запуска GNU/Linux-окружения на устройствах под управлением Android	5	56
<b>Смирнов В. А.</b> Поиск неисправностей в бортовых системах управления в процессе приемочного контроля	2	24
<b>Советов Б. Я., Колбанёв М. О., Татарникова Т. М.</b> Оценка вероятности эрланговского старения информации	6	25
<b>Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д.</b> Исследование процесса адаптивного автоматизированного управления	4	16
<b>Соколов А. А.</b> Применение рангового корреляционного анализа для статистического обоснования весовых коэффициентов показателей устойчивости системы	4	91
<b>Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жилиев А. А.</b> Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли	1	16
<b>Сольнищев Р. И., До Суан Чо.</b> Алгоритмизация обработки и передачи метеорологических данных в замкнутой системе управления «Природа-техногеника»	3	30
<b>Сольнищев Р. И., До Суан Чо.</b> Программная реализация метеорологической поддержки замкнутой системы управления «Природа-техногеника»	5	51
<b>Тарасов С. В., Бураков В. В.</b> Способы реляционного моделирования иерархических структур данных	6	58
<b>Таубин Ф. А., Чуйков А. В.</b> Кодирование с неравной защитой компрессированного видео в беспроводных сетях	5	69
<b>Фильченков А. А.</b> Субоптимальная звездчатая структура алгебраической байесовской сети	2	13
<b>Фуртат И. Б.</b> Алгоритм компенсации неизвестных мультигармонических возмущений для объектов с запаздыванием по управлению	5	19
<b>Чепруков Ю. В., Соколов М. А.</b> Вопросы универсального синтеза импульсных многочастотных сигналов	4	67
<b>Чернов В. Г.</b> Модификация алгоритмов управления, использующих правила нечеткого условного вывода	3	23
<b>Шакин О. В., Хансуваров Р. А., Колосков М. И.</b> Методы инженерного расчета схемы электрического согласования акустооптического модулятора	5	9
<b>Шокин Ю. И., Скидин А. С., Федорук М. П.</b> Особенности передачи и обработки информации в сверхскоростных волоконнооптических линиях связи	2	54
<b>Шпилевой В. Ф., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Кожевников С. С., Кольбова Э. В., Майоров И. В., Шепилов Я. Ю.</b> Разработка мультиагентной системы «Smart Factory» для оперативного управления ресурсами в режиме реального времени	6	91
<b>Эюбова Н. И.</b> Методы классификации в диагностике уrolитиаза с применением нечеткой логики для предобработки данных	6	85
<b>Юркин Д. В., Винель А. В., Таранин В. В.</b> Анализ временных и сложностных характеристик парольной аутентификации в защищенных операционных системах семейства Unix	3	62
15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» — DSPA'2013	1	93
68-я Всероссийская (с международным участием) конференция, посвященная Дню радио — RDC-2013	1	94
VI Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» ARMIMP-2013	3	100
Аннотации	1	100
Аннотации	2	99
Аннотации	3	106
Аннотации	4	102
Аннотации	5	104
Аннотации	6	111
Сведения об авторах	1	95
Сведения об авторах	2	93
Сведения об авторах	3	101
Сведения об авторах	4	97
Сведения об авторах	5	99
Сведения об авторах	6	104