

# МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 3 (120)

март

2011

**Редакционный совет:**

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

**Главный редактор:**  
ТЕРЯЕВ Е. Д.

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

**Выпускающий редактор:**  
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

**Ответственный секретарь:**  
ПЕТРИН К. В.

**Редакционная коллегия:**

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

**Редакция:**

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Зайцева М. В., Паршева Е. А.** Робастное управление линейным объектом при наличии возмущений и помех . . . . . 2  
**Колобашкина Л. В., Алюшин М. В., Алюшин В. М.** Синтез оптимальных законов коррекции цифровых высокоразмерных слабодемпфированных систем . . . . . 7

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Артемова С. В., Грибков А. Н.** Синтез управления теплотехнологическими аппаратами на основе интегрированного графа . . . . . 15  
**Тарасов Е. Н.** Централизованное управление автоматизированной информационной системой . . . . . 23

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Чебурахин И. Ф., Цурков В. И.** Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов . . . . . 27  
**Осипов В. Ю.** Оптимизация ассоциативных интеллектуальных систем . . . . . 35  
**Городецкий В. И., Бухвалов О. Л.** Управление нагрузкой ГРИД на основе многоагентной модели самоорганизации. Часть 1. Многоагентная модель и механизм самоорганизации . . . . . 40

### КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Круглова Т. Н.** Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях . . . . . 47  
**Шпрехер Д. М.** Нейросетевые оптимизационные модели поиска неисправностей электромеханических систем . . . . . 51  
**Алиев Э. Н.** Система мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций в строительстве . . . . . 55

### Журнал в журнале "УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Нагар Ю. Н., Ольшанский В. Ю., Панкратов В. М.** Динамика пьезогироскопа при работе в импульсном режиме . . . . . 63  
**Колесниченко С. В.** Обоснование систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичных летательных аппаратов . . . . . 67  
**Кабанов А. А.** Система автоматической посадки летательного аппарата корабельного базирования. Часть 2. Подсистема вертикального снижения . . . . . 74  
**Contents** . . . . . 79

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

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:  
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: [mec@novtex.ru](mailto:mec@novtex.ru)

УДК 62-506

**М. В. Зайцева**, инженер,

**Е. А. Паршева**, д-р техн. наук, проф.,

Астраханский государственный  
технический университет

zajceva.mary@yandex.ru, parsheva-el@yandex.ru

## Робастное управление линейным объектом при наличии возмущений и помех

*Решается задача построения робастной системы управления линейным стационарным объектом, которая позволяет скомпенсировать возмущения и помехи. Обоснована работоспособность системы управления при действии на объект неизмеряемых неограниченных возмущений на входе и ограниченных возмущений на выходе. Основные результаты получены с использованием технологии конструктивного вложения систем и метода вспомогательного контура. Приведены пример и результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие работоспособность предлагаемой схемы управления.*

**Ключевые слова:** инвариантные системы, вложение систем, делитель нуля, канонизация матриц, вспомогательный контур

### Введение

Одной из основных проблем современной теории управления является обеспечение требуемого качества системы в условиях действующих на объект внешних возмущений. В настоящее время разработано много методов и подходов к решению задачи компенсации внешних возмущений. Достаточно полно робастная теория управления и обширная библиография по ней представлены в [1]. В [2–5] получены компенсирующие внешние воздействия алгоритмы управления, построенные с использованием внутренней модели гармонических возмущений. В [6] идентифицируется внешнее синусоидальное возмущение, а затем уже синтезируется алгоритм управления. В [7–10] используется метод вспомогательного контура, в котором выделяется сигнал, несущий информацию о внешних и параметрических возмущениях, позволяющий получить требуемые оценки и, соответственно, скомпенсировать нежелательное воздействие на регулируемые параметры. Однако в [2–9] внешнее возмущение действует только на вход систем и отсутствует на выходе. Задачи такого типа в детерминированной постановке исследованы в работах, основанных на применении теории  $H_\infty$ -оптимизации [11]. Однако

применение этих методов требует наличия априорной информации о параметрах возмущений.

Наряду с таким направлением в решении этой проблемы, как робастное управление, заслуживает внимания и проблема инвариантности системы к возмущениям. Решение задачи обеспечения инвариантности [12] подразумевает определение таких структуры и параметров системы управления, при которых качество функционирования системы не зависит от действующих на нее возмущений.

Впервые на возможность создания системы регулирования, инвариантной к произвольным внешним возмущениям, было указано Г. В. Щипановым [13]. Позднее теория инвариантности распространяется на процессы управления, которые обладают нечувствительностью к возмущениям параметров математической модели системы (параметрической инвариантностью) [14], а также ставится задача достижения двукратной инвариантности, т. е. одновременной нечувствительности системы к параметрическим и внешним возмущениям [14]. Развитие теории инвариантности связано с именами Г. В. Щипанова, Н. Н. Лузина, П. И. Кузнецова, Б. Н. Петрова, В. С. Кулебакина, А. Ю. Ишлинского и многих других. При решении задач инвариантности возникли такие направления, как исследование инвариантных систем со средствами самонастройки [14] и инвариантных систем с точностью  $\varepsilon$  [15].

Необходимо обратиться к задаче обеспечения желаемого качества функционирования системы, которая решается, как правило, путем соответствующего размещения полюсов системы, т. е. формирования заданного характеристического полинома. Но это лишь одна и далеко не исчерпывающая характеристика представления линейной системы [16]. Используемые до сих пор при синтезе разнообразные формы задания полюсов — корней характеристического знаменателя — не могут исчерпывающим образом решить "проблемы матричного числителя". Изложенный в [12] новый алгебраический подход к анализу и синтезу многосвязных систем на основе вложения позволяет сформулировать и решить проблему матричного числителя в смысле его скалярного образа.

В данной статье излагается вытекающий из результатов исследований на основе вложения систем подход к модификации существующих методов робастного управления, позволяющий компенсировать внешние возмущения, действующие как на входе, так и на выходе системы. Рассматриваемый класс систем ограничивается рамками стационарных систем без запаздываний и ограничений на

управление. Основные результаты получены с использованием технологии конструктивного вложения систем [12] и метода вспомогательного контура [7–10].

### Постановка задачи

Рассмотрим объект управления, динамические процессы в котором описываются уравнением

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Df(t), x(t_0) = x_0; \quad (1)$$

$$z(t) = x(t) + S_1\xi(t); \quad (2)$$

$$y(t) = Lx(t) + S_2\xi(t), \quad (3)$$

где  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^m$ ,  $z \in \mathbb{R}^n$ ,  $y \in \mathbb{R}^r$  — векторы состояния, управления, измеряемых и регулируемых параметров соответственно;  $f \in \mathbb{R}^l$  — вектор внешних возмущений;  $\xi \in \mathbb{R}^r$  — шум на выходе статического звена модели системы;  $x_0$  — начальные условия;  $A, B, D, L, S_1, S_2$  — числовые матрицы соответствующих размеров.

Требуется получить алгоритм функционирования системы управления, обеспечивающий выполнение целевого условия

$$|Lx| < \delta \text{ при } t > T, \quad (4)$$

где  $\delta$  — достаточно малая величина;  $T$  — время, по истечении которого должна обеспечиваться требуемая динамическая точность после включения системы в работу.

*Предположения:*

- i) пара  $(A, B)$  — управляема, а пара  $(A, L)$  — наблюдаема;
- ii) возмущающее воздействие  $\xi(t)$  — ограниченная функция;
- iii) все матрицы в (1)–(3) известны.

Другие ограничения будут приведены в условиях утверждения.

### Метод решения

Решение сформулированной задачи состоит из следующих этапов:

- 1) стабилизировать объект управления, так как он может быть неустойчивым;
  - 2) построить систему, инвариантную к внешним  $f(t)$  и параметрическим возмущениям  $\rho$ , где  $\rho = \Delta A + \Delta BC$ ,  $\Delta A$  и  $\Delta B$  — постоянные возмущения матриц  $A$  и  $B$ ;
  - 3) используя метод вспомогательного контура, построить оценку шума  $\xi(t)$ ;
  - 4) обеспечить выполнение целевого условия (4).
- Будем формировать вектор управления в виде

$$u(t) = -C\tilde{y}(t), \quad \tilde{y}(t) = z(t) + S_1u_v(t), \quad (5)$$

где  $u_v(t)$  — вспомогательное управление измерением;  $C$  — числовая матрица регулятора. Так, инвариант-

ность системы (1)–(3) к внешним возмущениям  $f(t)$  связывается с выполнением равенства

$$W_y^f(\lambda) = L(\lambda I_n - A - BC)^{-1}D = 0, \quad (6)$$

где  $W_y^f(\lambda)$  — передаточная матрица от возмущения к выходу, а ее инвариантность к параметрическим возмущениям  $\rho$  связывается с выполнением равенства  $L(\lambda I_n - A + BC)^{-1} = L(\lambda I_n - A + BC - \rho)^{-1}$ .

**Краткое изложение известных результатов технологии вложения.** Основную методическую основу решения составляет метод канонизации матриц. В [1] канонизацией названо не обязательно единственное разложение любой матрицы  $M$  размера  $m \times n$  и ранга  $r$  на четверку матриц, удовлетворяющих следующему равенству в блочной записи:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_{r \times m}^L \\ \bar{M}_{(m-r) \times m}^L \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} \tilde{M}_{n \times r}^R & \bar{M}_{n \times (n-r)}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r & 0_{r \times (n-r)} \\ 0_{(m-r) \times r} & 0_{(m-r) \times (n-r)} \end{bmatrix},$$

где  $\bar{M}^L$  и  $\bar{M}^R$  — левый и правый делители нуля максимального ранга;  $\tilde{M}^L$  и  $\tilde{M}^R$  — левый и правый канонизаторы ( $\tilde{M}^L M \tilde{M}^R = I_r$ ,  $I_r$  — единичная матрица размера  $r$ ). Для любой матрицы  $M$  левый  $\bar{M}^L$  (правый  $\bar{M}^R$ ) делитель нуля максимального ранга характеризует все линейно зависимые комбинации строк (столбцов) исходной матрицы  $M$  в соответствии с тождеством

$$\bar{M}^L M = 0_{(m-r) \times n} (M \bar{M}^R = 0_{m \times (n-r)}).$$

При решении матричных уравнений методом канонизации используется понятие сводного канонизатора  $M^\sim$ , который характеризует совокупность линейно независимых комбинаций строк и столбцов исходной матрицы и вычисляется по формуле

$$M^\sim = \tilde{M}^R \tilde{M}^L.$$

Правым (левым) делителем единицы для матрицы  $M$  размера  $m \times n$  полного строчного (столбцевого) ранга называется матрица  $M^R (M^L)$ , удовлетворяющая условию

$$M M^R = I_m (M^L M = I_n).$$

Для необратимых матриц всегда существует множество делителей нуля максимального ранга и сводных канонизаторов. Например, все множество левых делителей единицы для матрицы  $M$  полного столбцевого ранга можно описать формулой [1]

$$\{M^L\}_\mu = (M_0^L + \mu \bar{M}^L),$$

где  $M_0^L$  — какой-либо левый делитель единицы матрицы  $M$ ;  $\mu$  — матрица заданного размера с произвольными элементами. Здесь и далее в нижних индексах при фигурных скобках множеств указаны варьируемые матрицы, порождающие все элементы этих множеств.

Эффективный способ одновременного формирования делителей нуля и канонизаторов изложен в [12]. Он основан на представлении делителей нуля в канонических базисах. Матрица  $M$  размера  $m \times n$  и ранга  $r$  дополняется двумя единичными матрицами слева и снизу, так что получается конструкция типа планшета

$$\frac{I_m | M_{m \times n}}{| I_n}$$

После этого выполняются элементарные преобразования строк и столбцов матрицы  $M$  с одновременным преобразованием входящих в конструкцию единичных матриц. Цель такого преобразования — привести матрицу  $M$  к каноническим базисам

$$\left[ \begin{array}{c} \tilde{M}_{r \times m}^L \\ \bar{M}_{(m-r) \times m}^L \end{array} \right] \left[ \begin{array}{cc} I_r & 0_{r \times (n-r)} \\ 0_{(m-r) \times r} & 0_{(m-r) \times (n-r)} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \tilde{M}_{n \times r}^R \\ \bar{M}_{n \times (n-r)}^R \end{array} \right]$$

Тогда блоки первоначально единичных матриц напротив (по строкам или столбцам) нулевых блоков правой верхней матрицы будут содержать делители нуля максимального ранга  $\bar{M}^L$  и  $\bar{M}^R$ , а блоки напротив единичной матрицы — канонизаторы  $\tilde{M}^L$  и  $\tilde{M}^R$ .

**Синтез управления по условиям инвариантности и заданного качества.** Воспользуемся алгоритмом определения параметров регулятора (5), используя технологию вложения систем [1].

**Утверждение 1.** Система (1)–(3) при заданных матрицах  $A, B, L$  обладает инвариантностью к внешним  $f(t)$  и параметрическим возмущениям  $p$  тогда и только тогда, когда существует ненулевая калибровочная матрица инвариантности  $\pi$ , для которой выполняется условие

$$\overline{\bar{L}^R}^L \pi \overline{\bar{L}^R}^L B \overline{\bar{L}^R}^L A \bar{L}^R \pi = 0,$$

матрицы эффективности возмущений принадлежат множествам

$$\{D\}_\mu = \bar{L}^R \pi \mu, \{\rho\}_\mu = \bar{L}^R \pi \mu,$$

где  $\mu$  — произвольная числовая матрица подходящего размера, и система (1)–(3), замкнутая любым регулятором (5), принадлежит множеству

$$\{C\}_{X,Y} = \left( \overline{\bar{L}^R}^L \pi B \right)^{\sim} \overline{\bar{L}^R}^L A \bar{L}^R \pi (\bar{L}^R \pi)^{\sim} + \overline{\bar{L}^R}^L \pi B X + Y \bar{L}^R \pi, \quad (7)$$

где  $X, Y$  — матрицы подходящих размеров с произвольными элементами.

Используем закон управления (5) с параметрами (7), тогда уравнение объекта (1), (3) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \{A - BC\}x(t) - BCS_1(\xi(t) + u_v(t)), \\ y(t) &= Lx(t) + S_2\xi(t), \end{aligned}$$

где матрица  $A_0 = A - BC$  гурвицева. Перейдем к представлению системы в виде "вход — выход":

$$Q_0(P)y(t) = R_1(P)u_v(t) + R_2(P)\xi(t), \quad (8)$$

где  $P = d/dt$  — оператор дифференцирования;  $Q_0(P) = \det(I_n P - A_0)$ ,  $R_1(P) = L(I_n P - A_0)^+(-BCS_1)$ ,  $R_2(P) = L(I_n P - A_0)^+(-BCS_1) + S_2$ .

Далее воспользуемся методом вспомогательного контура [2] и выделим сигнал, несущий информацию о возмущениях, для чего введем подсистему, которая описывается уравнением

$$Q_0(P)\bar{y}(t) = R_1(P)u_v(t), \quad (9)$$

и составим уравнение для сигнала рассогласования  $\eta(t) = y(t) - \bar{y}(t)$ , вычитая (9) из (8):

$$Q_0(P)\eta(t) = R_2(P)\xi(t). \quad (10)$$

Из уравнения (10) выделим сигнал  $\xi(t)$ :

$$\xi(t) = \hat{\xi}(t) = \frac{Q_0(P)}{R_2(P)} \eta(t). \quad (11)$$

Ясно, что для реализации (11) требуется гурвицевость полинома  $R_2(P)$ , что можно обеспечить соответствующим подбором матрицы  $S$ . Однако такой подбор не всегда возможен. Таким образом, должна существовать матрица  $S$ , обеспечивающая гурвицевость полиному  $R_2(P)$ , что является дополнительным ограничением, не оговоренным в предположении. Поскольку  $\deg Q_0 = \deg R_2 = n$ , то (11) реализуемо, и сформировав вспомогательный сигнал управления  $u_v(t)$  в виде

$$u_v(t) = -\hat{\xi}(t) = -\frac{Q_0(P)}{R_2(P)} \eta(t), \quad (12)$$

получим уравнение для вектора состояния объекта

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t),$$

из которого следует выполнение поставленного целевого условия (4).

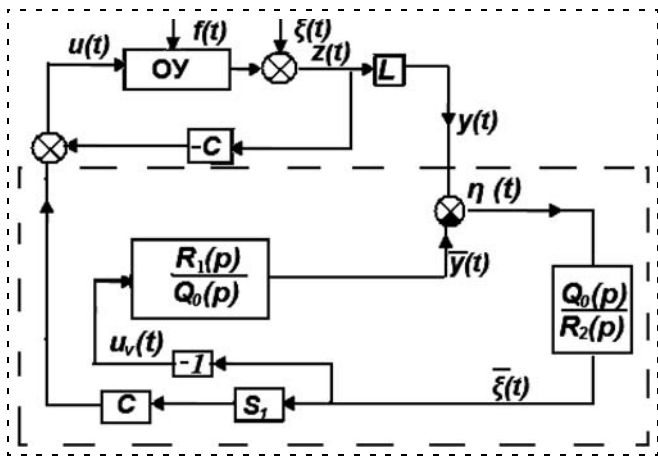


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Структурная схема системы представлена на рис. 1.

Сформулируем окончательный результат.

**Утверждение 2.** Пусть выполнены условия предположений, и существует матрица  $C$ , обеспечивающая минимально-фазовость системе (10). Тогда управляющее устройство, динамические процессы в котором описываются уравнениями (5), (7), (9), (12), обеспечивает выполнение целевого условия (4).

### Пример

Рассмотрим задачу стабилизации для объекта управления, динамические процессы в котором описываются уравнениями (1)–(3), где  $x \in \mathbb{R}^3$ ,  $u \in \mathbb{R}^2$ ,  $y \in \mathbb{R}^1$ ,  $f \in \mathbb{R}^2$ ,  $\xi \in \mathbb{R}^1$ ;

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 3 \\ -1 & 3 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, L = [0 \ 1 \ 0], D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0,5 \end{bmatrix}, S_2 = 2, \rho = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Формируем закон управления в виде  $u(t) = -C(z(t) + S_1 u_v(t))$ , где матрица  $C$  выбирается в соответствии с формулой (7) и принимает вид

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}.$$

Вспомогательное управляющее воздействие формируем в виде

$$u_v(t) = -\hat{\xi}(t) = -\frac{Q_0(P)}{R_2(P)} \eta(t),$$

где  $Q_0(P) = \det(I_n P - A_0)$ ,  $R_2(P) = L(I_n P - A_0)^+ (-BCS_1) + S_2$ .

Получим

$$u_v(t) = -\frac{\det(I_n P - A_0)}{L(I_n P - A_0)^+ (-BCS_1) + S_2} (y(t) - \bar{y}(t)) = \frac{P+2}{2P+1,5} (y(t) - \bar{y}(t)).$$

Тогда матрица  $A_0$  во вспомогательном контуре (9) имеет вид:

$$A_0 = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ -3 & 3 & -6 \end{bmatrix}, \text{ с собственными числами } \lambda_1 = -6, \lambda_2 = -2, \lambda_3 = -1.$$

Матрица  $A_0$  с параметрическими возмущениями принимает вид

$$A_0 + \rho = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & -5 \end{bmatrix}.$$

Нетрудно убедиться, что выполняется тождество:

$$L(\lambda I_n - A + BC)^{-1} = L(\lambda I_n - A + BC - \rho)^{-1},$$

характеризующее робастность синтезированной системы стабилизации к параметрическим возмущениям.

На рис. 2 приведены результаты моделирования системы управления при следующих исходных данных: начальные условия  $x^T(0) = [1 \ 5 \ 2]$ , возмущающие воздействия на входе  $f_1(t) = 2\sin 3t$ ,  $f_2(t) = 5\sin t$ , шум на выходе представляет собой случайный сигнал.

В данном случае целевое условие выполняется через 7 с. Теперь посмотрим, как будут изменяться выходные процессы в предлагаемой системе, если изменятся внешние возмущения, а именно шум будет представлять собой гармоническую функцию  $\xi(t) = \sin(0,5t)$  (рис. 3). Сравнив результаты с рис. 2, можно сделать вывод, что поставленная цель управления выполняется.

На рис. 4 представлены результаты моделирования, когда внешние возмущающие воздействия

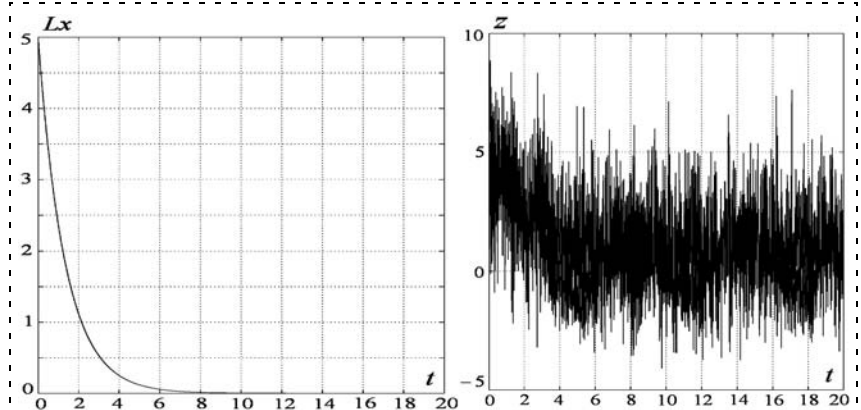


Рис. 2. Переходные процессы в системе, когда  $\xi(t)$  — случайный сигнал

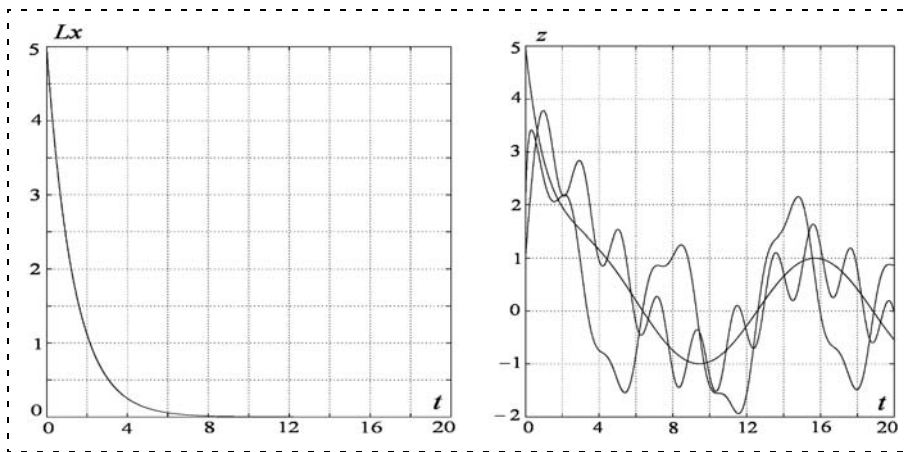


Рис. 3. Переходные процессы в системе, когда  $\xi(t) = \sin(0,5t)$

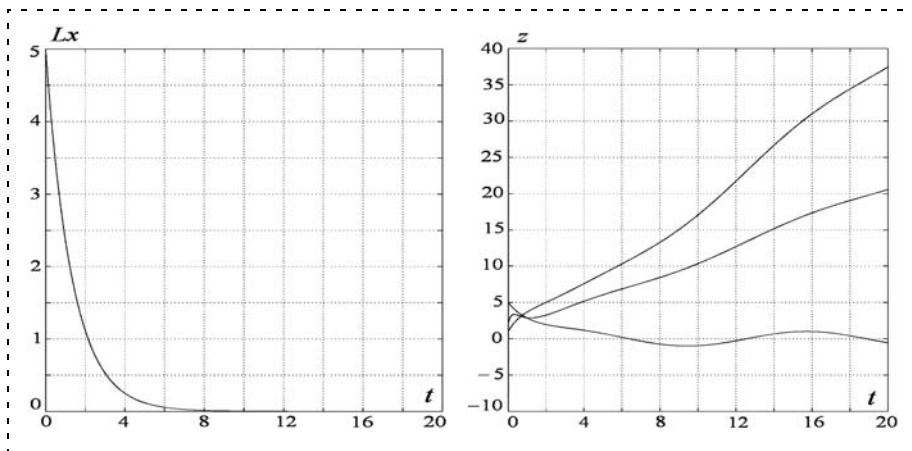


Рис. 4. Переходные процессы в системе, когда  $f_1(t) = 2t, f_2(t) = 5t, \xi(t) = \sin(0,5t)$

представляют собой неограниченные функции, точнее  $f_1(t) = 2t, f_2(t) = 5t$ , а  $\xi(t) = \sin(0,5t)$ . Безусловно, в этом случае получается неограниченное управляющее воздействие, которое с точки зрения реализации неприменимо.

Но поскольку качество управления осталось тем же самым, т. е. через 7 с выполнена поставленная цель управления, то на ограниченном диапазоне времени предлагаемый закон управления может быть использован.

### Заключение

Предложен способ построения системы управления для линейного объекта, у которого все параметры известны, а на входе и на регулируемом выходе действуют возмущения, причем возмущения эти различны. Спроектированная система управления позволяет скомпенсировать влияние возму-

щения на регулируемые переменные с заданной точностью и сделать их независимыми от возмущений на входе системы, что продемонстрировано на примере.

### Список литературы

1. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 500 с.
2. Никифоров В. О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 4. С. 69–73.
3. Бобцов А. А. Алгоритм робастного управления линейным объектом по выходу с компенсацией неизвестного детерминированного возмущения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2003. № 2. С. 93–97.
4. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. 1. Объекты с известными параметрами // АиТ. 2004. № 10. С. 13–24.
5. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. 1. Объекты с неизвестными параметрами // АиТ. 2004. № 11. С. 40–48.
6. Бобцов А. А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // АиТ. 2008, № 9.
7. Цыкунов А. М. Алгоритм робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // АиТ. 2007. № 7. С. 103–115.
8. Цыкунов А. М. Алгоритм робастного управления нестационарным объектом с компенсацией возмущений // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 33–40.
9. Цыкунов А. М. Алгоритм робастного управления линейным динамическим объектом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. С. 7–12.
10. Цыкунов А. М. Компенсация возмущений и помех при децентрализованном управлении по косвенным измерениям // АиТ. 2010. № 4. С. 120–129.
11. Егупов Н. Д. (ред.) Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. М.: Изд. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 745 с.
12. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во науч. литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006. 720 с.
13. Щипанов Г. В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов // АиТ. 1939. № 1. С. 49–66.
14. Современные методы проектирования систем автоматического управления / Под ред. Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчиева. М.: Машиностроение: 1967. 704 с.
15. Лузин Н. Н., Кузнецов П. И. К абсолютной инвариантности и инвариантности по  $\varepsilon$  в теории дифференциальных уравнений // ДАН СССР. 1946. Т. 51, № 4.
16. Kailath T. Linear systems. NJ: Prentice — Hall. Englewood Cliffs, 1980.
17. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989. 655 с.

**Л. В. Колобашкина**, канд. техн. наук, доц.,  
**М. В. Алюшин**, канд. техн. наук, доц.,  
**В. М. Алюшин**, инженер,  
 Национальный исследовательский  
 ядерный университет "МИФИ"  
 l\_v\_k2010@mail.ru

## Синтез оптимальных законов коррекции цифровых высокорамерных слабодемпфированных систем

*Рассмотрена методика синтеза цифровых законов коррекции жидкостной упругой ракеты при учете динамики объекта как твердого тела, колебаний жидкого топлива в двух баках и пяти тонов колебаний упругого корпуса. При проектировании систем управления слабодемпфированными высокоразмерными объектами подобного класса значительное внимание уделяется выбору перестраиваемых корректирующих устройств, обеспечивающих требуемые запасы устойчивости по фазам и модулям и гарантирующих работоспособность замкнутой системы при изменении параметров объекта в различных режимах работы.*

**Ключевые слова:** слабодемпфированная система, квадратичный функционал, оптимальное управление, динамическое программирование, уравнение Риккати

В настоящее время в промышленности и военной технике широкое применение получили высокоразмерные динамические системы со слабодемпфированными составляющими. Объекты данного класса обладают собственными частотами колебаний, приводящими к неустойчивости всей системы автоматического управления в замкнутом состоянии. Вследствие этого при проектировании таких систем значительное внимание уделяется синтезу корректирующих устройств, обеспечивающих работоспособность замкнутой системы при изменении параметров объекта в процессе полета, т. е. устройств, уменьшающих колебания до допустимого уровня и парирующих внешние возмущения.

В данной статье рассматривается метод синтеза цифровых законов коррекции на основе математического аппарата описания дискретно-непрерывных систем в пространстве состояний и оптимизации этих систем по квадратичным критериям качества с использованием аппарата динамического программирования. Предлагаемая методика синтеза корректирующих устройств применима к любым системам, допускающим представление в пространстве состояний.

### Описание исходной непрерывной системы и непрерывного функционала

Для синтеза корректирующих программ необходимо располагать математической моделью объекта управления. Представление исследуемой системы

с помощью дифференциальных уравнений в пространстве состояний позволяет проводить ее оптимизацию по квадратичному критерию качества на основе метода динамического программирования.

В пространстве состояний динамика исходной непрерывной системы может быть описана системой линеаризованных уравнений в форме Коши [1]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  — матрицы с размерностями  $(n \times n)$ ,  $(n \times p)$ ,  $(m \times n)$  соответственно;  $m \leq n$ ;  $\mathbf{x}(t)$  —  $n$ -мерный вектор фазовых координат;  $\mathbf{u}(t)$  —  $p$ -мерный вектор управления;  $\mathbf{y}(t)$  —  $m$ -мерный вектор выхода.

Матрица  $\mathbf{C}$  определяется как обратная матрица к решению уравнения Ляпунова [1]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{E} - \mathbf{E}\mathbf{M} &= \mathbf{B}\mathbf{B}^T; \\ \mathbf{C} &= \mathbf{E}^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{M}$  — матрица желаемой модели размерности  $(n \times n)$ .

Математической моделью требований качества системы являются показатели качества, которые выражаются через входные сигналы и состояние системы.

Рассмотрим квадратичный функционал (критерий качества) вида [1]

$$\begin{aligned} J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [(\dot{\mathbf{y}}(t) - \mathbf{M}\mathbf{y}(t))^T \tilde{\mathbf{Q}} (\dot{\mathbf{y}}(t) - \mathbf{M}\mathbf{y}(t)) + \\ + \mathbf{u}^T(t) \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{u}(t)] dt, \end{aligned} \quad (3)$$

для объекта, движение которого описывается системой дифференциальных уравнений (1). Здесь  $\tilde{\mathbf{Q}}$  и  $\tilde{\mathbf{R}}$  — симметрические положительно-определенные матрицы размерностей  $(n \times n)$  и  $(p \times p)$  соответственно, а  $\mathbf{M}$  — матрица желаемой модели.

Выделим в функционале терминальную составляющую, которая будет зависеть только от конечных значений фазовых координат:

$$\begin{aligned} G(\mathbf{x}_f) &= \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{M}\mathbf{y})^T \tilde{\mathbf{Q}} (\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{M}\mathbf{y}) \Big|_{t_f} = \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{M}\mathbf{C}\mathbf{x})^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{M}\mathbf{C}\mathbf{x}) \Big|_{t_f} = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{P}\mathbf{x}(t_f), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{P} = \mathbf{C}^T \mathbf{M}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{M}\mathbf{C}$ , так как в конечный момент времени  $\dot{\mathbf{y}}(t_f) = \mathbf{0}$ .

Тогда функционал примет вид

$$\begin{aligned} J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{P}\mathbf{x}(t_f) + \\ + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{M}\mathbf{y}]^T \tilde{\mathbf{Q}} (\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{M}\mathbf{y}) + \mathbf{u}^T \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{u}] dt. \end{aligned} \quad (5)$$

**Формирование дискретной модели системы и дискретного функционала качества с экстраполяцией входного сигнала первого порядка**

При проектировании дискретно-непрерывных систем управления возникает задача экстраполяции сигнала на входе системы, причем вид аппроксимирующей зависимости существенно влияет на точностные характеристики системы. Линейная экстраполяция вносит малые амплитудные и фазовые искажения и обладает достаточной простотой технической реализации. Поэтому для решения задачи синтеза построим дискретные модели непрерывной системы управления и квадратичного функционала качества, соответствующие линейной экстраполяции управляющего сигнала.

Общее решение системы уравнений (1) может быть записано в виде [1]

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{e}^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{e}^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B}\mathbf{u}(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Для построения дискретной модели непрерывного объекта необходимо вычислить интеграл, стоящий в правой части уравнения (6). Для этого требуется выбрать тип экстраполяции управляющего сигнала на интервале, определяемом тактом дискретности. Предположение о линейном изменении входа  $\mathbf{u}(\tau)$  на интервале дискретности по закону  $\mathbf{u}(\tau) = \mathbf{u}_i + \frac{\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i}{T} \tau$  приводит к следующей дискретной модели:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{R}\mathbf{u}_i + \mathbf{F}\mathbf{u}_{i+1}, \quad (7)$$

где  $\Phi = \mathbf{e}^{\mathbf{A}T}$  — переходная матрица системы (1);  $\mathbf{F} = (\mathbf{H}_0 - \mathbf{I}T) \frac{\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}}{T}$ ;  $\mathbf{R} = (\mathbf{H}_0\mathbf{B} - \mathbf{F})$ ;  $\mathbf{I}$  — единичная матрица;  $\mathbf{H}_0 = (\Phi - \mathbf{I})\mathbf{A}^{-1}$ ;  $T$  — такт дискретности.

Поскольку в системе (1) вход является скалярным, дискретная модель, описываемая соотношением (7), принимает вид

$$\mathbf{x}_{i+1} = \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{R}\mathbf{u}_i + \mathbf{F}\mathbf{u}_{i+1}. \quad (8)$$

Вводим новую переменную  $\mathbf{v}_i = \mathbf{u}_{i+1}$  и фиктивную переменную состояния  $\mathbf{z}_i$ , тогда соотношение (8) можно записать в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{i+1} = \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{R}\mathbf{z}_i + \mathbf{F}\mathbf{v}_i; \\ \mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{v}_i. \end{cases} \quad (9)$$

Далее преобразуем систему к форме Коши. Для этого переходим к расширенному вектору переменных состояния размерности  $(n+1)$ :

$$\mathbf{x}_{pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ \mathbf{z}_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

и используем расширенные матрицы исходной системы

$$\Phi_p = \begin{bmatrix} \Phi & \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}; \quad \mathbf{F}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1}, \quad (11)$$

что позволяет представить выражения (9) в следующем виде:

$$\mathbf{x}_{pi+1} = \Phi_p \mathbf{x}_{pi} + \mathbf{F}_p \mathbf{v}_i. \quad (12)$$

Для построения дискретной модели функционала качества для случая скалярного входа введем подстановку:

$$\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{M}\mathbf{y} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{M}\mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{C}(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}) - \mathbf{M}\mathbf{C}\mathbf{x} = (\mathbf{C}\mathbf{A} - \mathbf{M}\mathbf{C})\mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{B}\mathbf{u}. \quad (13)$$

С учетом этого критерий качества (3) с тактом квантования  $T$  примет следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_i+T} \{(\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{B}\mathbf{u})^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{B}\mathbf{u}) + r\mathbf{u}^2\} dt = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x} dt + \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} \mathbf{u} dt + \right. \\ &\left. + \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{u}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x} dt + \int_{t_i}^{t_i+T} (\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + r) \mathbf{u}^2 dt \right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

где  $\mathbf{H} = \mathbf{C}\mathbf{A} - \mathbf{M}\mathbf{C}$ .

В связи с тем, что для исследуемой системы рассматривается применение экстраполятора первого порядка, вектор переменных состояния и входной сигнал на интервале дискретности изменяются по линейному закону:

$$\mathbf{x}(t)_{[t_i, t_{i+1}]} = \mathbf{x}(t_i) + \frac{\mathbf{x}(t_{i+1}) - \mathbf{x}(t_i)}{T} (t - t_i); \quad (15)$$

$$u(t) = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{T} (t - t_i). \quad (16)$$

Чтобы определить дискретную форму квадратичного функционала качества, соответствующую экстраполяции управляющего сигнала первого порядка, подставим уравнения (15) и (16) в соотношение (14) и берем каждый из четырех интегралов, стоящих под знаком суммы в выражении (14) по отдельности.

Рассмотрим выражение для первого интеграла:

$$\begin{aligned} J_1 &= \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x} dt = \int_{t_i}^{t_i+T} \left[ \mathbf{x}(t_i) + \frac{\mathbf{x}(t_{i+1}) - \mathbf{x}(t_i)}{T} \times \right. \\ &\left. \times (t - t_i) \right]^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \left[ \mathbf{x}(t_i) + \frac{\mathbf{x}(t_{i+1}) - \mathbf{x}(t_i)}{T} (t - t_i) \right] dt. \quad (17) \end{aligned}$$



Подробно расписав соотношение (17) и приведя подобные члены, получим:

$$\begin{aligned}
J_1 &= \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}(t_i) dt + \\
&+ \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}(t_{i+1})(t-t_i) dt - \\
&- \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}(t_i)(t-t_i) dt + \\
&+ \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_{i+1}) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}(t_{i+1})(t-t_i)^2 dt - \\
&- \frac{2}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_{i+1}) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}(t_i)(t-t_i)^2 dt + \\
&+ \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}(t_i)(t-t_i)^2 dt = \\
&= T \left( \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i + \right. \\
&+ \frac{1}{3} \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_{i+1} - \frac{2}{3} \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i + \\
&+ \left. \frac{1}{3} \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i \right) = \frac{T}{3} \left( \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_{i+1} + \right. \\
&+ \left. \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_{i+1} + \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i \right). \quad (18)
\end{aligned}$$

Переходим к рассмотрению второго интегрального выражения:

$$\begin{aligned}
J_2 &= \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u dt = \int_{t_i}^{t_i+T} \left[ \mathbf{x}(t_i) + \frac{\mathbf{x}(t_{i+1}) - \mathbf{x}(t_i)}{T} \times \right. \\
&\times \left. (t-t_i) \right]^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} \left[ u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{T} (t-t_i) \right] dt. \quad (19)
\end{aligned}$$

Проводя те же операции, что и для соотношения (17), получаем интегралы в виде:

$$\begin{aligned}
J_2 &= \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i dt + \\
&+ \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} (t-t_i) dt - \\
&- \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i (t-t_i) dt + \\
&+ \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_{i+1}) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i (t-t_i) dt +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_{i+1}) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} (t-t_i)^2 dt - \\
&- \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_{i+1}) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i (t-t_i)^2 dt - \\
&- \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} (t-t_i)^2 dt + \\
&+ \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+T} \mathbf{x}^T(t_i) \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i (t-t_i)^2 dt = \\
&= T \left( \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i + \frac{1}{2} \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} - \right. \\
&- \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i + \frac{1}{2} \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i + \\
&+ \frac{1}{3} \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} - \frac{1}{3} \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i - \\
&- \left. \frac{1}{3} \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} + \frac{1}{3} \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i \right) = \\
&= \frac{T}{6} \left( \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} + \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i + \right. \\
&+ 2 \mathbf{x}_{i+1}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_{i+1} + 2 \mathbf{x}_i^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} u_i \left. \right). \quad (20)
\end{aligned}$$

Выражение для третьего интеграла является симметричным по отношению к соотношению (20):

$$\begin{aligned}
J_3 &= \int_{t_i}^{t_i+T} u \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x} dt = \int_{t_i}^{t_i+T} \left\{ \left[ u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{T} \times \right. \right. \\
&\times \left. \left. (t-t_i) \right] \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \left[ \mathbf{x}(t_i) + \frac{\mathbf{x}(t_{i+1}) - \mathbf{x}(t_i)}{T} (t-t_i) \right] \right\} dt = \\
&= \frac{T}{6} \left( u_i \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_{i+1} + u_{i+1} \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i + \right. \\
&+ 2 u_{i+1} \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_{i+1} + 2 u_i \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{x}_i \left. \right). \quad (21)
\end{aligned}$$

Четвертое интегральное выражение преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
J_4 &= \int_{t_i}^{t_i+T} (r + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u^2 dt = \\
&= \int_{t_i}^{t_i+T} \left\{ (r + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) \left[ u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{T} (t-t_i) \right]^2 \right\} dt = \\
&= \frac{T}{3} (r + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) [u_i^2 + u_{i+1} u_i + u_{i+1}^2]. \quad (22)
\end{aligned}$$

Далее подставляем полученные соотношения (18), (20), (21) и (22) в выражение (14), учитывая при

этом значение  $\mathbf{x}_{i+1}$ , которое определяется из уравнения (8). В результате имеем:

$$\begin{aligned}
J = & \frac{T}{12} \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{x}_i^T (\mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi + \Phi^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} + 2\Phi^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi + \\
& + 2\mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H}) \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_i^T (\mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{R} + 2\Phi^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{R} + \\
& + \Phi^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + 2\mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u_i + u_i (\mathbf{R}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} + \\
& + 2\mathbf{R}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi + 2\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H}) \mathbf{x}_i + \\
& + \mathbf{x}_i^T (\mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} + 2\Phi^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi + \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + \\
& + 2\Phi^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u_{i+1} + u_{i+1} (\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} + 2\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi + \\
& + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} + 2\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \Phi) \mathbf{x}_i + u_{i+1} (2\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{R} + \\
& + \mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + 2\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{R} + r + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u_i + \\
& + u_i (2\mathbf{R}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} + 2\mathbf{R}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} + r + \\
& + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u_{i+1} + u_{i+1} (2\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} + 2\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + \\
& + 2\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} + 2r + 2\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u_{i+1} + \\
& + u_i (2\mathbf{R}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{R} + \mathbf{R}^T \mathbf{H}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} + \mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{R} + \\
& + 2r + 2\mathbf{B}^T \mathbf{C}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B}) u_i]. \quad (23)
\end{aligned}$$

Затем группируем члены выражения (23) таким образом, чтобы удобнее было перейти к расширенному вектору переменных состояния (10), предварительно заменив при этом  $u_{i+1} \rightarrow v_i$ , а  $u_i \rightarrow z_i$ . В результате получим:

$$\begin{aligned}
J = & \frac{T}{12} \sum_{i=0}^{\infty} [2(\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i) + \\
& + 2(\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i) + \\
& + (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i) + \\
& + (\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i) + \\
& + (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} v_i + 2(\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} v_i + \\
& + 2(\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} v_i + (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} v_i + \\
& + (\mathbf{H} \mathbf{F} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i) + 2(\mathbf{C} \mathbf{B} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i) + \\
& + (\mathbf{C} \mathbf{B} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{C} \mathbf{B} z_i) + 2(\mathbf{H} \mathbf{F} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} (\mathbf{H} \Phi \mathbf{x}_i + \\
& + \mathbf{H} \mathbf{R} z_i) + 2(\mathbf{C} \mathbf{B} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} v_i + 2(\mathbf{H} \mathbf{F} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} v_i + \\
& + 2(\mathbf{C} \mathbf{B} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{H} \mathbf{F} v_i + 2(\mathbf{H} \mathbf{F} v_i)^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{C} \mathbf{B} v_i + \\
& + 2r v_i^2 + 2r z_i^2 + v_i r z_i + z_i r v_i]. \quad (24)
\end{aligned}$$

В конечном виде дискретный функционал качества, соответствующий экстраполяции входного сигнала первого порядка, определяется соотношением

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{x}_{pi}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_{pi}^T \mathbf{S}^T v_i + v_i \mathbf{S} \mathbf{x}_{pi} + v_i \mathbf{W} v_i], \quad (25)$$

где

$$\begin{cases}
\mathbf{Q} = \frac{T}{3} \left\{ \mathbf{K}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{K} + \mathbf{L}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{L} + \frac{1}{2} \mathbf{K}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{L} + \right. \\
\left. + \frac{1}{2} \mathbf{L}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{K} + r \mathbf{Z}^T \mathbf{Z} \right\}; \\
\mathbf{S} = \frac{T}{3} \left\{ \frac{1}{2} \mathbf{N}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{K} + \mathbf{M}_0^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{L} + \right. \\
\left. + \frac{1}{2} \mathbf{M}_0^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{K} + \mathbf{N}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{L} + \frac{1}{2} r \mathbf{Z} \right\}; \\
\mathbf{W} = \frac{T}{3} \left\{ \mathbf{M}_0^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{M}_0 + \mathbf{N}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{N} + \mathbf{M}_0^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{N} + \right. \\
\left. + \mathbf{N}^T \tilde{\mathbf{Q}} \mathbf{M}_0 + r \right\};
\end{cases} \quad (26)$$

$\mathbf{K} = [\mathbf{H} : \mathbf{C} \mathbf{B}]$ ;  $\mathbf{L} = [\mathbf{H} \Phi : \mathbf{H} \mathbf{R}]$ ;  $\mathbf{M}_0 = \mathbf{C} \mathbf{B}$ ;  $\mathbf{N} = \mathbf{H} \mathbf{F}$ ;  $\mathbf{Z}_{[1 \times (n+1)]} = [0 \dots 01]$ .

В свою очередь, для расширенной системы, с учетом вида (5) функционала, терминальная составляющая будет следующей:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{pN}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}_{pN}^T \mathbf{P}_p \mathbf{x}_{pN},$$

где  $\mathbf{P}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ .

Таким образом, построена дискретная модель квадратичного функционала, обладающая требуемой точностью для синтеза оптимальных законов управления:

$$\begin{aligned}
J = & \frac{1}{2} \mathbf{x}_{pN}^T \mathbf{P}_p \mathbf{x}_{pN} + \\
& + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [\mathbf{x}_{pi}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_{pi}^T \mathbf{S}^T v_i + v_i \mathbf{S} \mathbf{x}_{pi} + v_i \mathbf{W} v_i]. \quad (27)
\end{aligned}$$

В дальнейшем для удобства восприятия информации вектор состояния будем обозначать  $\mathbf{x}_i$ , а подразумевать будем расширенный вектор  $\mathbf{x}_{pi}$ .

### Определение оптимальных законов управления методом динамического программирования

Определение оптимальных законов управления может проводиться на основе принципа оптимальности. Процедура синтеза, в которой использован принцип оптимальности, называется также методом динамического программирования.

Принцип оптимальности состоит в том, что оптимальная стратегия управления обладает тем свойством, что каковы бы ни были начальное состояние и управление на начальных шагах, дальнейшее управление должно быть оптимально по отношению к состоянию, которое является следствием предшествующего управления. Иными словами, любая стратегия управления, которая оптимальна на интервале  $[i, N]$ , обязательно является оптимальной на интервале  $[i + 1, N]$  для  $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

Для рассматриваемых динамических процессов, у которых каждое текущее состояние может рассматриваться как начальное, из принципа оптимальности следует, что оптимальная стратегия является функцией текущего состояния и не зависит от того, как система попала в это состояние.

Цифровой процесс управления описывается уравнением (12) при заданном значении  $\mathbf{x}_0$ :

$$\mathbf{x}_{i+1} = \Phi_p \mathbf{x}_i + \mathbf{F}_p v_i \quad (28)$$

Цель проектирования состоит в определении управления  $v_i^*$ , которое минимизирует квадратичный критерий качества вида (27) [2]:

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}_N^T \mathbf{P}_p \mathbf{x}_N + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [\mathbf{x}_i^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_i^T \mathbf{S}^T v_i + v_i \mathbf{S} \mathbf{x}_i + v_i \mathbf{W} v_i]. \quad (29)$$

Обозначим  $J_{N-k}[\mathbf{x}_k]$  критерий качества на интервале  $[k, N]$ , т. е. на последних  $N-k$  интервалах или шагах. Тогда

$$J_{N-k} = \frac{1}{2} \mathbf{x}_N^T \mathbf{P}_p \mathbf{x}_N + \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{N-1} [\mathbf{x}_i^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_i^T \mathbf{S}^T v_i + v_i \mathbf{S} \mathbf{x}_i + v_i \mathbf{W} v_i], \quad k = 0, \dots, N.$$

Пусть минимальное значение  $J_{N-k}[\mathbf{x}_k]$  описывается выражением

$$\omega_{N-k}[\mathbf{x}_k] = \min_{v_k} (J_{N-k}[\mathbf{x}_k]).$$

При  $k = N$  последнее выражение представляет собой критерий качества или выигрыш на последнем (нулевом шаге), который есть не что иное, как терминальная составляющая. Поэтому

$$\omega_0[\mathbf{x}_N] = \frac{1}{2} \mathbf{x}_N^T \mathbf{P}_p \mathbf{x}_N. \quad (30)$$

При  $k = N - 1$  получаем одношаговый процесс, или процесс с одним интервалом управления, ко-

торый совпадает с последним шагом. Тогда оптимальное значение критерия качества будет определяться следующим соотношением:

$$\omega_1(\mathbf{x}_{N-1}) = \min_{v_{N-1}} \frac{1}{2} [\mathbf{x}_{N-1}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_{N-1} + v_{N-1} \mathbf{S} \mathbf{x}_{N-1} + \mathbf{x}_{N-1}^T \mathbf{S}^T v_{N-1} + v_{N-1} \mathbf{W} v_{N-1} + (\Phi_p \mathbf{x}_{N-1} + \mathbf{F}_p v_{N-1})^T \times \times \mathbf{P}_p (\Phi_p \mathbf{x}_{N-1} + \mathbf{F}_p v_{N-1})] = \min_{v_{N-1}} J_1(\mathbf{x}_{N-1}). \quad (31)$$

Для осуществления операции минимизации перепишем выражение (31), которое необходимо минимизировать, в виде

$$\begin{aligned} \omega_1(\mathbf{x}_{N-1}) &= \min_{v_{N-1}} J_1(\mathbf{x}_{N-1}) = \\ &= \min_{v_{N-1}} \frac{1}{2} [\mathbf{x}_{N-1}^T (\mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p) \mathbf{x}_{N-1} + \\ &+ v_{N-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p) \mathbf{x}_{N-1} + \mathbf{x}_{N-1}^T (\mathbf{S}^T + \\ &+ \Phi_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{F}_p) v_{N-1} + v_{N-1} (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{F}_p) v_{N-1}]. \quad (32) \end{aligned}$$

Запишем условие минимума  $J_1(\mathbf{x}_{N-1})$ :

$$\frac{\partial J_1(\mathbf{x}_{N-1})}{\partial v_{N-1}} = 0.$$

В результате получим

$$(\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{F}_p) v_{N-1} + (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p) \mathbf{x}_{N-1} = 0. \quad (33)$$

Таким образом, оптимальное управление имеет вид

$$v_{N-1}^* = -(\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p) \mathbf{x}_{N-1}. \quad (34)$$

Подставив выражение (34) в формулу (31), получим

$$\begin{aligned} \omega_1(\mathbf{x}_{N-1}) &= \frac{1}{2} \mathbf{x}_{N-1}^T [\mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p - (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p)^T \times \\ &\times (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p)] \mathbf{x}_{N-1}. \quad (35) \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\mathbf{K}_0 = \mathbf{P}_p; \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_1 &= \mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p - \\ &- (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p)^T (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{P}_p \Phi_p). \quad (37) \end{aligned}$$

Тогда оптимальные значения выигрыша в соответствии с выражениями (30) и (35) примут вид

$$\omega_0(\mathbf{x}_{N-1}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}_{N-1}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{x}_{N-1}; \quad (38)$$

$$\omega_1(\mathbf{x}_{N-1}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}_{N-1}^T \mathbf{K}_1 \mathbf{x}_{N-1}. \quad (39)$$

Положим теперь  $k = N - 2$  и запишем выражение для  $\omega_2(\mathbf{x}_{N-2})$ :

$$\begin{aligned} \omega_2(\mathbf{x}_{N-2}) = \min_{\upsilon_{N-2}} \frac{1}{2} [\mathbf{x}_{N-2}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_{N-2} + \upsilon_{N-2} \mathbf{S} \mathbf{x}_{N-2} + \\ + \mathbf{x}_{N-2}^T \mathbf{S}^T \upsilon_{N-2} + \upsilon_{N-2} \mathbf{W} \upsilon_{N-2} + \\ + (\Phi_p \mathbf{x}_{N-2} + \mathbf{F}_p \upsilon_{N-2})^T \mathbf{K}_1 (\Phi_p \mathbf{x}_{N-2} + \mathbf{F}_p \upsilon_{N-2})] = \\ = \min_{\upsilon_{N-2}} J_2(\mathbf{x}_{N-2}). \end{aligned} \quad (40)$$

Запишем условие минимума  $J_2(\mathbf{x}_{N-2})$ :

$$\frac{\partial J_2(\mathbf{x}_{N-2})}{\partial \upsilon_{N-2}} = 0.$$

Осуществляя операцию минимизации, найдем

$$\omega_2(\mathbf{x}_{N-2}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}_{N-2}^T \mathbf{K}_2 \mathbf{x}_{N-2}, \quad (41)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_2 = \mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{K}_1 \Phi_p - \\ - (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_1 \Phi_p)^T (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_1 \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_1 \Phi_p). \end{aligned} \quad (42)$$

Таким образом, оптимальное управление на предпоследнем шаге имеет вид

$$\upsilon_{N-2}^* = -(\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_1 \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_1 \Phi_p) \mathbf{x}_{N-2}.$$

Этот процесс может быть продолжен рекуррентно. Аналогичным образом можно показать, что  $j$ -м шаге итерационного процесса для любого  $j = 0, 1, \dots, N$  функция Беллмана будет вычисляться по формуле

$$\omega_j(\mathbf{x}_{N-j}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}_{N-j}^T \mathbf{K}_j \mathbf{x}_{N-j}, \quad (43)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_j = \mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{K}_{j-1} \Phi_p - (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_{j-1} \Phi_p)^T (\mathbf{W} + \\ + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_{j-1} \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K}_{j-1} \Phi_p) \end{aligned} \quad (44)$$

с начальным значением матрицы  $\mathbf{K}_0 = \mathbf{P}_p$ .

Из теории оптимального управления известно, что при  $j \rightarrow \infty$  матрица  $\mathbf{K}_j$  стремится к некоторому установившемуся значению:

$$\mathbf{K} = \lim_{j \rightarrow \infty} \mathbf{K}_j. \quad (45)$$

Таким образом, в установившемся режиме уравнение (44) примет вид [1]

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = \mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{K} \Phi_p - \\ - (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \Phi_p)^T (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \Phi_p). \end{aligned} \quad (46)$$

Это уравнение называется уравнением Риккати, а  $\mathbf{K}$  — коэффициент Риккати, который необходимо найти, чтобы определить оптимальные законы управления.

Оптимальное управление определяется следующим образом:

$$\upsilon_i^* = -(\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \Phi_p) \mathbf{x}_i.$$

### Решение дискретного уравнения Риккати методом, основанным на треугольном разложении

Дискретное уравнение Риккати для задачи с бесконечным интервалом времени, выведенное в процессе вычисления функции Беллмана, имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = \mathbf{Q} + \Phi_p^T \mathbf{K} \Phi_p - \\ - (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \Phi_p)^T (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \Phi_p). \end{aligned} \quad (47)$$

Для решения этого уравнения быстродействующим алгоритмом, основанным на треугольном разложении, необходимо его привести к форме [2]

$$\mathbf{A}' + \mathbf{B}' \mathbf{K} + \mathbf{K} \mathbf{C}' + \mathbf{K} \mathbf{D}' \mathbf{K} = 0, \quad (48)$$

где  $\mathbf{A}'$ ,  $\mathbf{B}'$ ,  $\mathbf{C}'$ ,  $\mathbf{D}'$  — некоторые матрицы, а  $\mathbf{K}$  — искомого решение уравнения Риккати, необходимое для нахождения оптимального закона управления, который описывается выражением

$$\upsilon_i^* = -(\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \Phi_p) \mathbf{x}_i. \quad (49)$$

Уравнение Риккати (47) путем несложных преобразований [2] приводится к виду

$$\begin{aligned} [(\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1}]^T (\mathbf{Q}^T - \mathbf{S} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T) - \\ - [(\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1}]^T \mathbf{K} + \\ + \mathbf{K} [\mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{F}_p^T ((\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1})^T (\mathbf{Q}^T - \mathbf{S} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T) + \\ + (\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)] - \mathbf{K} \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{F}_p^T \times \\ \times [(\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1}]^T \mathbf{K} = 0. \end{aligned} \quad (50)$$

Этот метод решения уравнения Риккати (47) заключается в приведении блочной матрицы  $\mathbf{Z}$  размерности  $(2n \times 2n)$  следующей структуры [1]:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{F}_p^T ((\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1})^T (\mathbf{Q}^T - \mathbf{S} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T) + \Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T & -\mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{F}_p^T ((\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1})^T \\ \dots & \vdots \\ -((\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1})^T (\mathbf{Q}^T - \mathbf{S} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T) & \vdots ((\Phi_p - \mathbf{F}_p \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T)^{-1})^T \end{bmatrix} \quad (51)$$

к верхнему треугольному виду с помощью преобразования  $\mathbf{Z} = \mathbf{U}\mathbf{T}\mathbf{U}^{-1}$ , где  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{T}_{12} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{T}_{11}$ ,  $\mathbf{T}_{22}$  — верхние треугольные, а  $\mathbf{T}_{12}$  — произвольная матрицы. Преобразование необходимо проводить таким образом, чтобы матрица  $\mathbf{T}_{11}$  имела диагональные элементы, модули которых строго меньше единицы, тогда матрица  $\mathbf{K}$ , которая определяется соотношением

$$\mathbf{K} = \mathbf{U}_{21} \mathbf{U}_{11}^{-1},$$

будет решением уравнения Риккати.

Матрицы  $\mathbf{U}_{21}$ ,  $\mathbf{U}_{11}$  являются блоками матрицы

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{11} & \mathbf{U}_{12} \\ \mathbf{U}_{21} & \mathbf{U}_{22} \end{bmatrix}.$$

Зная матрицу  $\mathbf{K}$ , можно легко определить оптимальный закон управления динамической системой по формуле

$$v_i^* = -\mathbf{G}x_i, \quad (52)$$

где  $\mathbf{G} = (\mathbf{W} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \mathbf{F}_p)^{-1} (\mathbf{S} + \mathbf{F}_p^T \mathbf{K} \mathbf{F}_p)$ .

Имея матрицу обратной связи, строим матрицу замкнутой системы  $\mathbf{L}$ :

$$\mathbf{L} = \mathbf{F}_p - \mathbf{F}_p \mathbf{G}.$$

Переводим матрицу замкнутой системы в непрерывную область:

$$\mathbf{A} = \frac{2}{T} (\mathbf{L} + \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{L} - \mathbf{I}).$$

Находим ее спектр. Если спектр совпадает с желаемым, задача решена верно.

### Моделирование поведения синтезированной системы с помощью LabView

Жидкостные крупногабаритные ракеты-носители, применяемые для вывода космических летательных аппаратов на орбиту, описываются линеаризованными векторно-матричными уравнениями 20-го порядка, которые учитывают динамику ракеты как твердого тела, колебания жидкого топлива в центральном и шести боковых баках, а также пять тонов колебаний упругого корпуса [1]. Исследуемый объект является слабодемпфированным и неустойчивым на первых секундах полета, так как в его передаточной функции содержатся два полюса в правой полуплоскости, которые соответствуют неустойчивости ракеты относительно траектории полета. Поэтому на начальном участке полета движение по траектории без автоматической системы регулирования невозможно. Синтез законов стабилизации и управления системами подобного класса, который рассматривался в данной статье, основан на принципе динамического программирования и включает в себя решение уравнения Риккати методом, основанным на треугольном разложении. В целях проверки правильности использованного математического аппарата проведено моделирование поведения баллистической ракеты с помощью программной среды LabView.

LabView (среда разработки лабораторных виртуальных приборов) представляет собой среду графического программирования, которая широко используется в промышленности, образовании и научно-исследовательских лабораториях. Если в традиционных алгоритмических языках программирование основано на вводе текстовых команд, последовательно образующих программный код, то в LabView

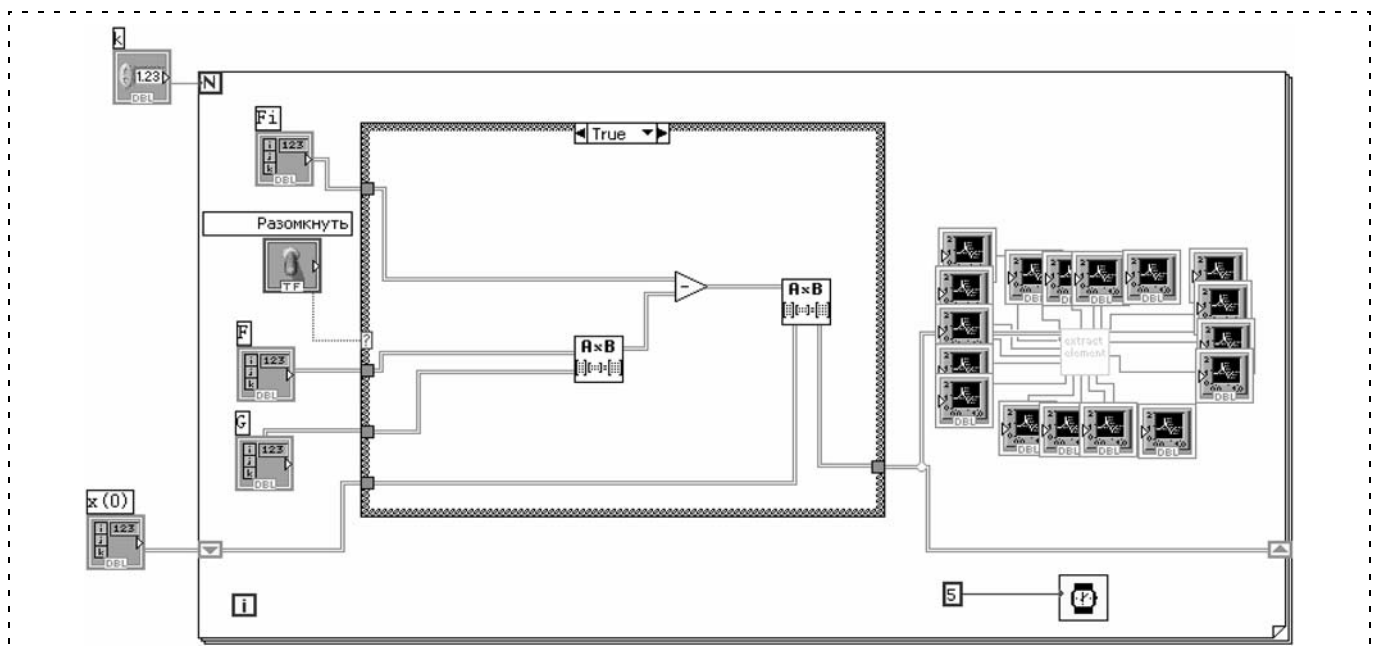


Рис. 1. Блок-диаграмма замкнутой системы

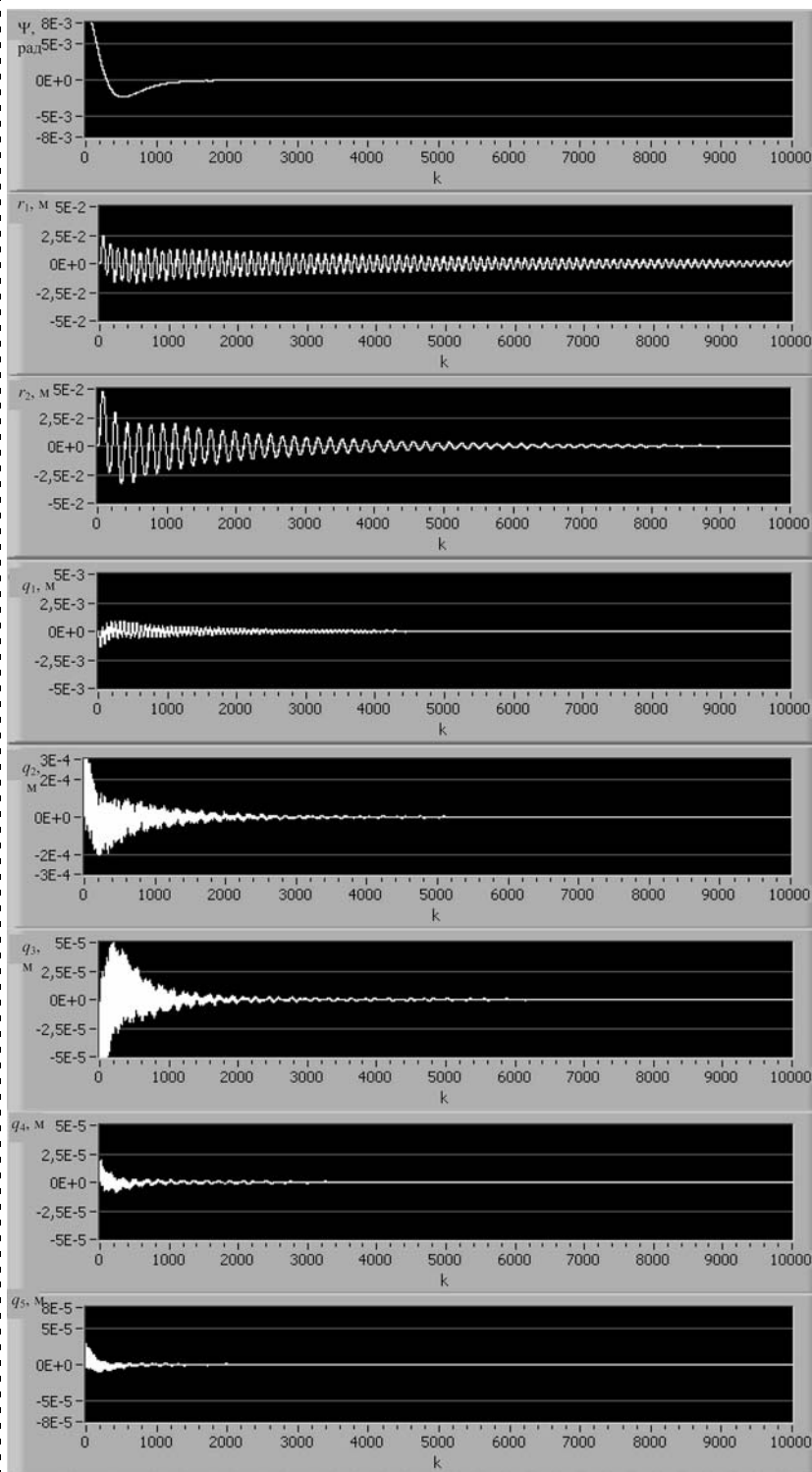


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе по углу рысканья  $\psi$ , фазовым координатам  $r_1$  и  $r_2$ , соответствующим колебаниям жидкости соответственно в малом и большом баках, по фазовым координатам  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$ , соответствующим первым пяти тонам колебаний упругого корпуса при отработке ненулевого начального условия по углу  $\psi$  для исследуемого объекта

используется язык графического программирования, где алгоритм создается в графической иконной форме (pictorial form), образующей блок-диаграмму (block-diagram), что позволяет исключить множество синтаксических деталей. На рис. 1 изображена блок-диаграмма, моделирующая поведение замкнутой системы. Реализация обратной связи по состоянию осуществляется путем ввода матрицы обратной связи  $\mathbf{G}$  в уравнения состояния.

На рис. 2 приведены переходные процессы в замкнутой системе в зависимости от числа тактов  $k$  при такте дискретизации  $T = 0,001$  с.

Из рис. 2 видно, что угол  $\psi$  практически полностью отработывается к 12 секунде полета. Дольше всего устанавливаются переходные процессы по координатам  $r_1$  и  $r_2$ , соответствующим колебаниям жидкости соответственно в малом и большом баках при отработке ненулевого начального условия по углу  $\psi$ . Колебания жидкости во втором баке совершаются с амплитудой в 2 раза большей, чем в первом баке, что говорит о необходимости улучшения демпфирования колебаний жидкости во втором баке.

Далее приводятся процессы стабилизации по фазовым координатам  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$ , соответствующим первым пяти тонам колебаний корпуса при отработке ненулевого начального условия по углу  $\psi$  для исследуемого объекта. Данные процессы имеют ярко выраженный затухающий характер и практически полностью устанавливаются до 20 секунды полета.

### Заключение

Затухающий характер быстро устанавливающихся переходных процессов в синтезированной системе подтверждает правильность и эффективность изложенного выше математического аппарата.

### Список литературы

1. Алюшин М. В., Колобашкина Л. В. Синтез оптимальных законов стабилизации жидкостной упругой ракеты на основе решения дискретного уравнения Риккати // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 2.
2. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986.

# СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.421.2

**С. В. Артемова**, канд. техн. наук, доц.,  
**А. Н. Грибков**, канд. техн. наук, доц.,  
Тамбовский государственный  
технический университет  
cbeta\_art@rambler.ru

## Синтез управления теплотехнологическими аппаратами на основе интегрированного графа

*Предложен подход к синтезу управления теплотехнологическими аппаратами на основе интегрированного графа. Рассмотрены основные особенности теплотехнологических аппаратов как объектов управления, приведены постановки задач алгоритмизации синтеза управления и примеры их решения.*

**Ключевые слова:** синтез управления, интегрированный граф, теплотехнологический аппарат, множество состояний функционирования

### Введение

Одной из приоритетных задач на современном этапе научно-технического прогресса во всем мире стала проблема энергоресурсосбережения. В энергоемких отраслях промышленности остро стоят вопросы модернизации производственных процессов и управления ими по энергетическим показателям. Одним из направлений снижения энергоресурсопотребления является внедрение вычислительных систем, позволяющих синтезировать управления в целях минимизации таких функционалов, как затраты энергии, расход топлива, потери качества выпускаемой продукции и производительности управляемого процесса и т. д. Повышение эффективности, качества и сокращение сроков внедрения в эксплуатацию создаваемых систем достигается использованием при их разработке методов синтеза управления.

Применение подобных систем в промышленности позволит не только сократить энергоресурсопотребление на 10...30 %, но и продлить срок эксплуатации теплотехнологических аппаратов (ТА), а также повысить качество выпускаемой продукции.

Предлагаемый в статье подход к синтезу управления ТА на основе технологии интегрированного графа базируется на концепциях системного анализа и комплексного моделирования с использованием анализа и синтеза систем на множестве состояний функционирования, оптимального управ-

ления, электрических измерений, интеллектуальных и иерархических систем, графов, искусственного интеллекта, современных информационных технологий и объектно-ориентированного программирования.

### Особенности ТА как объектов управления

К наиболее энергоемким объектам управления в современной промышленности относятся ТА, представляющие собой одно- или многокамерные устройства, в пределах которых осуществляются все стадии данного теплотехнологического процесса [1].

Как правило, в составе камер ТА присутствует оборудование для подачи тепла и оборудование, осуществляющее движение рабочих органов. Например, в сушильных установках в качестве оборудования для подачи тепла могут использоваться: калориферы, газовые и топливные горелки, топки, термоизлучатели, генераторные лампы, пневматические форсунки, холодильники и т. д. К оборудованию, осуществляющему движение рабочих органов, относятся механизмы, использующие электроприводы: турбины, валки, транспортеры, вентиляторы, вибропитатели, шнеки, дробилки, барабаны, циклоны, насосы и т. д. ТА можно рассматривать как многомерный технологический объект, состоящий из совокупности объектов (элементов его оборудования), осуществляющих теплотехнологический процесс.

Как объекты управления ТА имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при алгоритмизации синтеза управления. Основными особенностями ТА являются: большие затраты энергоресурсов, высокие значения режимных параметров объекта управления в процессе его реальной эксплуатации. Вектор управления может содержать два типа компонентов — общего действия (на весь аппарат) и частные (локальные). В качестве выходных переменных могут рассматриваться контролируемые величины в отдельных частях аппарата. Основными показателями эффективности функционирования ТА являются качество получаемого продукта и производительность. Управляющее устройство вырабатывает воздействия, которые должны учитывать возможные изменения состояний функционирования, обусловленные наличием временного лага между управляющими воздействиями и выходными переменными.

Для учета этих особенностей система управления ТА должна реализовывать алгоритмы, позволяющие идентифицировать текущее состояние функционирования объекта, и оперативно реаги-

ровать на изменения основных параметров процесса. При этом необходимо учитывать неполноту и неточность данных, влияющих на процессы, происходящие в ТА.

### ТА как объекты управления

Модели объектов, составляющих ТА, представляются на множестве состояний функционирования (МСФ) [2]. Среди факторов, влияющих на изменение состояния функционирования, выделяются: внутренние, связанные с изменением вида и параметров моделей динамики объектов ТА (соответствующие подмножества обозначим  $H_i^{мд}$ ,  $i = \overline{1, \eta}$ ) и внешние ( $H^{кф}$  — факторы, косвенно влияющие на управляющие воздействия, например, качество топливной смеси, давление пара, изменение частоты питающей сети и т. п.;  $H^{ос}$  — изменения окружающей среды, например, температура, влажность, давление и т. д.;  $H_i^{дф}$ ,  $i = \overline{1, \eta}$ , — наличие или отсутствие дестабилизирующих факторов), где  $\eta$  — число объектов, составляющих ТА. Таким образом, для динамических режимов ТА множество состояний функционирования можно записать в виде:

$$H^д = H_1^{мд} \times \dots \times H_\eta^{мд} \times H_1^{дф} \times \dots \times H_\eta^{дф} \times H^{кф} \times H^{ос}.$$

Также необходимо учитывать состояния работоспособности технических средств. Множество состояний работоспособности  $H^р$  связано с состояниями отказов отдельных элементов. Значение переменной состояния функционирования  $h$  объекта определяется состояниями ее частей, т. е.  $h = \langle h^д, h^р \rangle$ ,  $h^д \in H^д$ ,  $h^р \in H^р$ . Будем считать, что состояние  $h$  изменяется, если изменяется значение одной из ее компонент. В этом случае МСФ системы можно представить декартовым произведением множеств  $H = H^д \times H^р$ . В множестве  $H$  можно выделить два подмножества: наиболее вероятных  $H^в$  и критических  $H^к$  состояний. Подмножество  $H^в$  включает состояния с нормальной работоспособностью элементов, а подмножество  $H^к$  содержит все состояния с отказами технических средств. При разработке системы управления необходимо создать алгоритмическое обеспечение, включающее модели и алгоритмы управления для состояний  $h \in H^в$ , а также возможные действия при  $h \in H^к$ .

Таким образом, общую математическую модель динамики ТА на МСФ можно представить множеством моделей  $M_h = \{M_{ih^р}, i = \overline{1, n}, h^р \in H\}$ ,  $h \in H$ , где  $M_{ih^р}$  — модель динамики  $i$ -го объекта ТА в состоянии  $h^р$ , вид которой зависит от значения  $H_i^{мд}$ .

Наиболее распространенным в литературе математическим аппаратом, применяемым для описания моделей процессов, протекающих в ТА, являются системы уравнений теплопереноса. Точное решение этих уравнений осуществляется численными методами и в теории автоматического управления не используется [3]. Поэтому модели множества  $M_h$  для режима "Пуск" предлагается описывать в виде дифференциальных уравнений.

В системе модель динамики объекта идентифицируется множеством моделей, описывающих динамические режимы отдельных камер

$$M_{h^р} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}.$$

Модель  $i$ -й камеры представляет собой систему дифференциальных уравнений с разрывной правой частью

$$m_i: \dot{z}_i = A_i z_i(t) + B_i u_i(t) + C_i \lambda_i(t) + D_i \rho_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \\ \lambda_i(t) = z_i(t) - z_{i-1}(t), \quad \rho_i(t) = z_i(t) - z_{i+1}(t), \quad (1)$$

где  $A_i, B_i, C_i, D_i$  — матрицы параметров модели для  $i$ -й камеры;  $z_i(t)$  — вектор фазовых координат  $i$ -й камеры;  $u_i$  — вектор управляющих воздействий;  $\lambda_i, \rho_i$  — векторы возмущающих воздействий со стороны соседних камер слева и справа,  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  — число камер.

Наибольшую сложность представляет идентификация моделей процессов ТА в режиме "Процесс". Математические модели таких объектов содержат много эмпирических коэффициентов, изменяющихся в широком диапазоне и вызывающих большие затруднения при идентификации. В то же время квалифицированный оператор достаточно хорошо управляет такими объектами, пользуясь показаниями приборов и накопленным опытом. В 1974 г. Мамдани показал возможность применения идей нечеткой логики для построения системы управления объектом [4]. Нечеткое управление используется при недостаточном знании объекта управления, но при наличии опыта управления им, а также в нелинейных системах, идентификация которых слишком трудоемка, и в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать знания эксперта. В статье приводится пример управления ТА, использующий методы искусственного интеллекта, такие как искусственные нейронные сети и нечеткая логика.

### Постановки задач алгоритмизации синтеза управления

Будем различать задачи управления теплотехнологическим процессом (режим "Процесс") и задачи управления динамическими режимами объектов, входящих в ТА (режим "Пуск").

В общем виде задача алгоритмизации синтеза управления режимом "Процесс" формулируется следующим образом. Задаются:

- оператор  $f$ , позволяющий определять значения компонентов вектора выходных переменных



$y = (y_1, \dots, y_G)^T$  в зависимости от значений векторов управляющих воздействий  $u = (u_1, \dots, u_D)^T$  и возмущающих воздействий  $x = (x_1, \dots, x_P)^T$  при различных состояниях функционирования

$$H = \{h_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}, \quad (2)$$

где  $l$  — номер состояния функционирования;  $L$  — число возможных состояний функционирования;  $G, D, P$  — размерности векторов  $y, u$  и  $x$  соответственно.

Оператор  $f$  условно можно записать в виде

$$f: U \times X \times H \rightarrow Y, \quad (3)$$

где  $U, X, Y, H$  — множества значений управляющих и возмущающих воздействий, выходных переменных и изменений состояний функционирования соответственно;

- ограничения на значения выходных переменных  $y$  и изменение управляющих воздействий  $u$ , т. е.

$$y_g \in Y_g^{\text{доп}}, g = \overline{1, G}; \quad (4)$$

$$u_d \in U_d^{\text{доп}}, d = \overline{1, D}, \quad (5)$$

где  $Y_g^{\text{доп}}, U_d^{\text{доп}}$  — области допустимых значений  $y_g$  и  $u_d$  соответственно;

- критерий оптимальности, характеризующий качество продукции и производительность работы объекта.

Требуется определить такие значения управляющих воздействий  $u_d^*$ , при которых выполняются ограничения (4), (5) и критерий (1) достигает минимального значения.

Постановку задачи алгоритмизации синтеза управления режимом "Пуск" можно представить следующим образом.

Задаются:

- модель динамики объекта на МСФ  $M_h$ :

$$\dot{z} = f_1(A, B, z, u, h, t), \quad (6)$$

где  $A, B$  — матрицы параметров модели объекта;  $z, u$  — векторы фазовых координат и управляющих воздействий;  $h \in H$  — переменная состояния функционирования;  $t$  — текущее время;

- ограничения на изменение фазовых координат, управляющих воздействий и минимизируемый функционал, т. е.

$$z(t_0) = z^0 \rightarrow z(t_k) = z^k, \quad (7)$$

$$\forall t \in [t_0, t_k]: u(t) \in [u_H, u_B], \quad (8)$$

$$J = \int_{t_0}^{t_k} g(t, z(t), u(t)) dt \rightarrow \min_u, \quad (9)$$

где  $z^0$  и  $z^k$  — начальное и конечное состояния вектора фазовых координат;  $u_H$  и  $u_B$  — нижняя и верхняя границы управления;  $t_0, t_k$  — начальное и конечное время;  $J$  — минимизируемый функционал.

Массив исходных данных для численного решения сформулированной задачи имеет вид:  $\mathfrak{R} = \{A, B, z_0, z_k, u_H, u_B, t_0, t_k, h\}$ .

Необходимо перевести объект, представленный моделью (6) из начального состояния  $z^0$  в конечное  $z^k$  за фиксированный интервал времени при ограничении на управляющие воздействия (8) с минимумом функционала (9) и с учетом текущего состояния функционирования  $h$ .

Решить задачу (6)–(9) — значит для заданного массива  $\mathfrak{R}$  определить вид функции управления  $u^*(t), t \in [t_0, t_k]$  и рассчитать ее параметры, определить оптимальную траекторию изменения фазовых координат  $z^*(t)$  и значение функционала  $J$ , где  $g$  — вид функции управления: расход то-

плива  $J_T = \int_{t_0}^{t_k} |u(t)| dt \rightarrow \min_u$  или затраты энергии

$J_\varepsilon = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \rightarrow \min_u$  в зависимости от объекта

управления.

### Интегрированный граф технологии в задачах алгоритмизации синтеза управления

Анализу и синтезу систем автоматического управления с применением в качестве основного математического аппарата раздела комбинаторной топологии — линейных направленных графов, которые обладают двумя важными свойствами: наглядностью и экономией в вычислениях, посвящены следующие работы. Использование графического представления системы линейных дифференциальных уравнений для решения задач анализа и синтеза — работа академика Б. П. Петрова [5]. В ней предложены две формы представления уравнений — схемная и графная — получившие дальнейшее развитие в виде структурных схем направленных графов. Первая форма представления (схемная) легла в основу направления анализа динамических систем, получившего название структурных методов, рассмотрена в работах Шаталова А. С., Кузовкина Н. Т., Сучилина А. М. и др. Вторая форма (графная) не получила такого широкого применения, хотя успешно использовалась в структурных исследованиях Гальперина И. И. и др. В работе Райцына Т. М. рассматривается возможность использования направленных графов для решения задач синтеза линейных систем автоматического управления [6]. Однако в перечисленных работах не приводятся решения задач управления процессами ТА.

Для решения этой проблемы предлагается технология синтеза решения задачи управления процессами ТА на основе интегрированного графа, вершины которого находятся на различных уровнях абстракции — стратах. Каждый уровень характеризуется рядом особенностей, переменных, законов и принципов, с помощью которых описывается по-

ведение системы. Чтобы такое иерархическое описание было эффективным, необходима как можно большая независимость моделей для различных уровней системы. Чтобы отличить эту концепцию иерархии от других, для нее используется термин *стратифицированная система*. Уровни абстракции, включающие стратифицированное описание, называются стратами [7].

Целью решения задачи синтеза является получение управления процессами ТА, минимизирующего заданные функционалы. Введение страт позволяет выделить типовые этапы решения задач синтеза управления, а также оптимизировать поисковые алгоритмы на графе за счет рассмотрения только альтернативных путей в пространстве состояний.

Технология отражает представление множества задач алгоритмизации синтеза управления ТА в пространстве состояний. В пространстве состояний вершины графа соответствуют состояниям решения задач и представляют собой процедуры, а дуги соответствуют этапам решения задач. Граф также включает одно или несколько целевых условий, которые соответствуют решениям исходной задачи. Поиск в пространстве состояний характеризует

решение задачи как процесс нахождения пути решения (цепочки, ведущей к решению задачи) от исходного к целевому [8].

Интегрированный граф технологии (рис. 1) содержит следующие страты (уровни абстракции): информационной модели всего ТА, информационных моделей технологического оборудования, классов задач на МСФ, режимов работы, целей управления, математических моделей объектов, стратегий управления, особенностей задач, анализа и синтеза. На всех стратах выполняется обращение активных процедур к базам данных и знаний системы. Передача информации между пользователями и активными процедурами осуществляется посредством диалогов интеллектуального интерфейса, имеющего в своем составе экспертную систему "Энергосберегающее управление динамическими объектами" [9].

Верхние страты предназначены для идентификации информационных моделей ТА и его технологического оборудования. Процедуры модулей страты реализуют сценарии диалога с пользователем, в результате работы которых извлекается необхо-

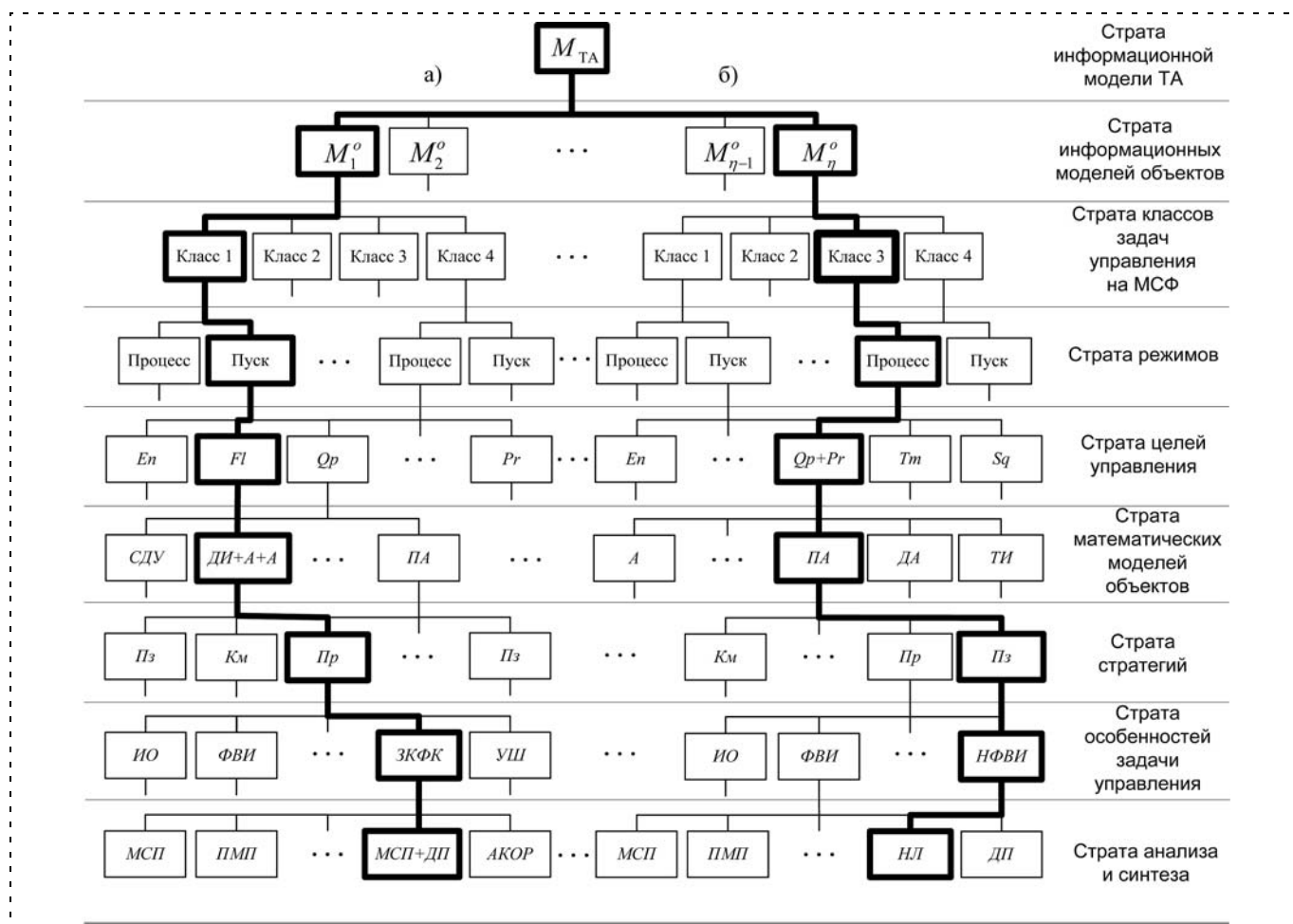


Рис. 1. Интегрированный граф технологии интеллектуализации синтеза решения задачи управления ТА: ветвь *a* — синтез решения для режима "Пуск"; ветвь *b* — синтез решения для режима "Процесс"

димая информация об объекте управления, хранимая в базе данных.

Цель принадлежит множеству целей: уменьшение затрат энергии, расхода топлива, улучшение качества выпускаемой продукции, повышение производительности управляемого процесса, быстрогодействия и т. д. Для достижения каждой цели минимизируется соответствующий ей функционал. Для достижения нескольких целей могут использоваться комбинированные функционалы.

Страта классов задач управления на МСФ дает возможность при описании моделей объекта рассматривать условия работы объекта с комплексным учетом воздействия внешнего окружения и других факторов, имеющих детерминированную, вероятностную или нечеткую (расплывчатую) природу. Изменение  $h$  происходит в случайные моменты времени. В зависимости от изменения  $h$  на интервале времени управления и идентификации значений  $h$  выделяют четыре класса задач управления на МСФ [2].

Страты режимов и целей предназначены для определения функционала, соответствующего заданной цели управления. В зависимости от режима работы объекта цель управления может меняться. Так, например, в режиме "Пуск" в ТА может не быть загрузки материала, поэтому решать задачу повышения его качества на данном этапе бессмысленно.

Страта моделей идентифицирует математическую модель объекта, пригодную для решения задачи алгоритмизации синтеза управления. Причем процедуры модулей идентификации позволяют по заданным экспериментальным данным подобрать наиболее адекватную модель объекта управления. Модели могут быть представлены в виде: СДУ — систем дифференциальных уравнений в частных производных с граничными условиями; ПА — процедурно-аналитических моделей (нейронные сети, нечеткая логика и т. д.); А — апериодического звена, ДИ — двойного интегратора; ДА — двойного апериодического звена, ТИ — тройного интегратора; а также систем дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, например, ДА + ДА, ДИ + А + А и т. д.

Страта стратегий предлагает следующие стратегии реализации оптимального управления: Пр — программная, Пз — позиционная и Км — комбинированная и ее разновидности.

Страта особенностей содержит процедуры, позволяющие решать задачи с учетом интегральных ограничений (ИО), фиксированным и нефиксированным временным интервалом управления (ФВИ и НФВИ), закрепленными и незакрепленными концами траектории фазовых координат (ЗКФК и НКФК), фиксированными и интервальными параметрами моделей объектов (ФП и ИП), с учетом шумов (УШ) и т. д.

Страта анализа и синтеза содержит процедуры реализации методов: синтезирующих переменных

(МСП), принципа максимума Понтрягина (ПМП), аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), динамического программирования (ДП), комбинированных (МСП + ДП), нечеткой логики (НЛ) и т. д.

Важнейшими компонентами системы, используемыми интегрированный граф технологии, являются база знаний (БЗ) и база данных (БД). БЗ обеспечивает не только рассуждения на основе опыта, но и фундаментальные знания о математических методах анализа и синтеза и знания прикладного характера, используемые разработчиками алгоритмического обеспечения, в том числе математические постановки задач управления; соотношения для определения видов функций управления при различных функционалах, соотношения для определения синтезирующих переменных, соотношения, используемые при решении задач имитационного моделирования, и др. Эти соотношения используются при разработке новых моделей с применением принципов наследования. В БД содержатся сведения о результатах внедрения системы компьютерного оптимального управления, реальном эффекте от использования алгоритмов управления; виды моделей динамики, состав моделей для многостадийных объектов, значения параметров; используемые стратегии; ограничения и т. д.

Приведенная технология позволяет оперативно синтезировать решения задач управления без участия лица, принимающего решение.

#### **Пример алгоритмизации синтеза на основе технологии интегрированного графа**

Рассмотрим алгоритмизацию синтеза управления на примере пятикамерной вальцеленточной сушильной установки СВЛ [10]. СВЛ представляет собой коридор, в котором размещены продуктовый пластинчатый и скребковый конвейеры. Коридор разделен на пять камер. Материал (пастообразный краситель) и сушильный агент (нагретый воздух) движутся в коридоре противоточно, а в каждой камере обеспечивается перекрестный ток за счет рециркуляционных вентиляторов и подогрев сушильного агента в паровых калориферах. Паста пигмента формируется на валках в виде кусков квадратного сечения, уложенных на пластинчатый транспортер.

В режиме "Пуск" необходимо разогреть камеры СВЛ без загрузки пастообразного материала до рабочей температуры. В соответствии с классификацией систем на МСФ задача управления относится к первому классу согласно классификации [2]. Здесь в качестве объектов управления рассматриваются паровые калориферы камер. Динамика их разогрева представляется множеством моделей (6). Модель  $i$ -й камеры представляет собой систему

дифференциальных уравнений. Например, для второй камеры система имеет вид

$$M_2 : \begin{cases} \dot{z}_{21}^1 \\ \dot{z}_{22}^1 \\ \dot{z}_{21}^2 \\ \dot{z}_{21}^3 \end{cases} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,1402 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{21}^1(t) \\ z_{22}^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,788 \end{pmatrix} u_2^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,1091 \end{pmatrix} l_2^1(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ -0,2439 \end{pmatrix} r_2^1(t), z_{21}^1 \in [20; 37,1); \\ \text{-----} \\ -0,3203 z_{21}^2(t) + 0,088 u_2^2(t) - 0,0941 l_2^2(t) + 0,733 r_2^2(t), z_{21}^2 \in [37,1, 56,4); \\ \text{-----} \\ -0,1213 z_{21}^3(t) + 0,2365 u_2^3(t) - 0,102 l_2^3(t) + 0,328 r_2^3(t), z_{21}^3 \in [56,4, 69,8). \end{cases} \quad (10)$$

В задаче ресурсосберегающего управления (6)–(9)

для функционала  $J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n J_i = \sum_{i=1}^n \int_{t_i^0}^{t_i^K} |u_i(t)| dt \rightarrow \min$

необходимо обеспечить выполнение условия  $t_1^K = t_2^K = \dots = t_n^K$ , т. е. конечное значение времени разогрева у всех камер должно совпадать для обеспечения одновременного завершения динамических режимов во всех зонах. Различие во времени окончания разогрева  $t_i^K$  зон обусловлено тем, что calorиферы, установленные в камерах СВЛ, отличаются своими техническими характеристиками и, следовательно, изменяются параметры моделей динамики  $m_i$  для каждой камеры. Определяются оптимальная управляющая программа  $u_i^*(\bullet) = (u_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^K])$  и траектория изменения фазовых координат  $z_i^*(\bullet) = (z_i^*(t), t \in [t_i^0, t_i^K] / u_i^*(t))$ , соответствующие каждой зоне. На основе результатов полного анализа рассчитываются оптимальные программы управления для каждой камеры СВЛ:

$$u_i^*(t) = \begin{cases} \gamma_1, t \in [t_i^0, t_i^1), \\ \gamma_2, t \in [t_i^1, t_i^2), \\ \gamma_3, t \in [t_i^2, t_i^K], \end{cases} \quad i = \overline{1, n}, \text{ где } \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \in [u_H, u_B],$$

$t_i^1, t_i^2$  — времена переключения. Здесь варьируемыми переменными являются  $t_i^K$ . Определяется максимальное конечное время разогрева  $t_{\max}^K = \max\{t_i^K\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Вычисляются времена начала разогрева для каждой камеры относительно  $t_{\max}^K$ :  $t_i^0 = t_{\max}^K - t_i^K$ . В результате получившееся множество программ  $\{u_1^*(\bullet), u_2^*(\bullet), \dots, u_n^*(\bullet)\}$ , реализуемых на рассчитанных интервалах времен  $[t_i^0, t_{\max}^K]$ , позволяет минимизировать функционал  $J_{\Sigma}$  по всем камерам совместно и обеспечивает выполнение условия  $t_1^K = t_2^K = \dots = t_n^K$ .

Путь решения задачи управления для режима "Пуск" показан на рис. 1. На рис. 2 представлены графики управляющих воздействий и фазовых координат для СВЛ.

Экономия энергоресурсов при оптимальном управлении сушильной установкой с применением предложенного алгоритма может составлять 5...10 %.

В режиме "Процесс" целью является минимизация потерь качества и производительности процесса сушки. Поставленная задача обусловлена тем, что на конечную абсолютную влажность материала ( $\varphi_k^K$ ) большое влияние оказывает процесс сушки в камерах, в которых снимается основная или поверхностная влага. Изменяя время пребывания материала в них, добиваются требуемого качества материала на выходе сушильной установки при оптимальной производительности процесса сушки. Для этого оценивают влажность материала в указанных камерах множеством датчиков по нейронным сетям. Проверяют попадание рассчитанных значений влажности материала в заданные нормированные диапазоны, в зависимости от которых определяют числовые оценки мер доверия достижения требуемой влажности материала на выходе сушильной установки методом Демпстера-Шафера [8]. На основании полученных значений получают нечеткий вывод, определяющий значение, на которое требуется изменить скорость движения пластинчатого конвейера для достижения требуемого качества материала на выходе сушильной установки. Если полученное значение отлично от нуля, на это значение изменяют скорость движения пластинчатого конвейера.

В соответствии с классификацией систем на МСФ сушильная установка с управляющим устройством в режиме "Процесс" относится к третьему классу [2]. В системах третьего класса переменная состояний функционирования  $h$  может изменяться в пределах временного интервала управления  $T \in [t_0; t_k]$ , значение  $h$  в текущий момент времени  $t \in T$  идентифицируется (известно). Модель объекта третьего класса представляет собой кусочно-постоянную траекторию изменения оператора системы, моменты переключения оператора случайны и соответствуют сменам значений  $h$  на траектории.

Задачи управления процессом сушки могут рассматриваться применительно к отдельным партиям

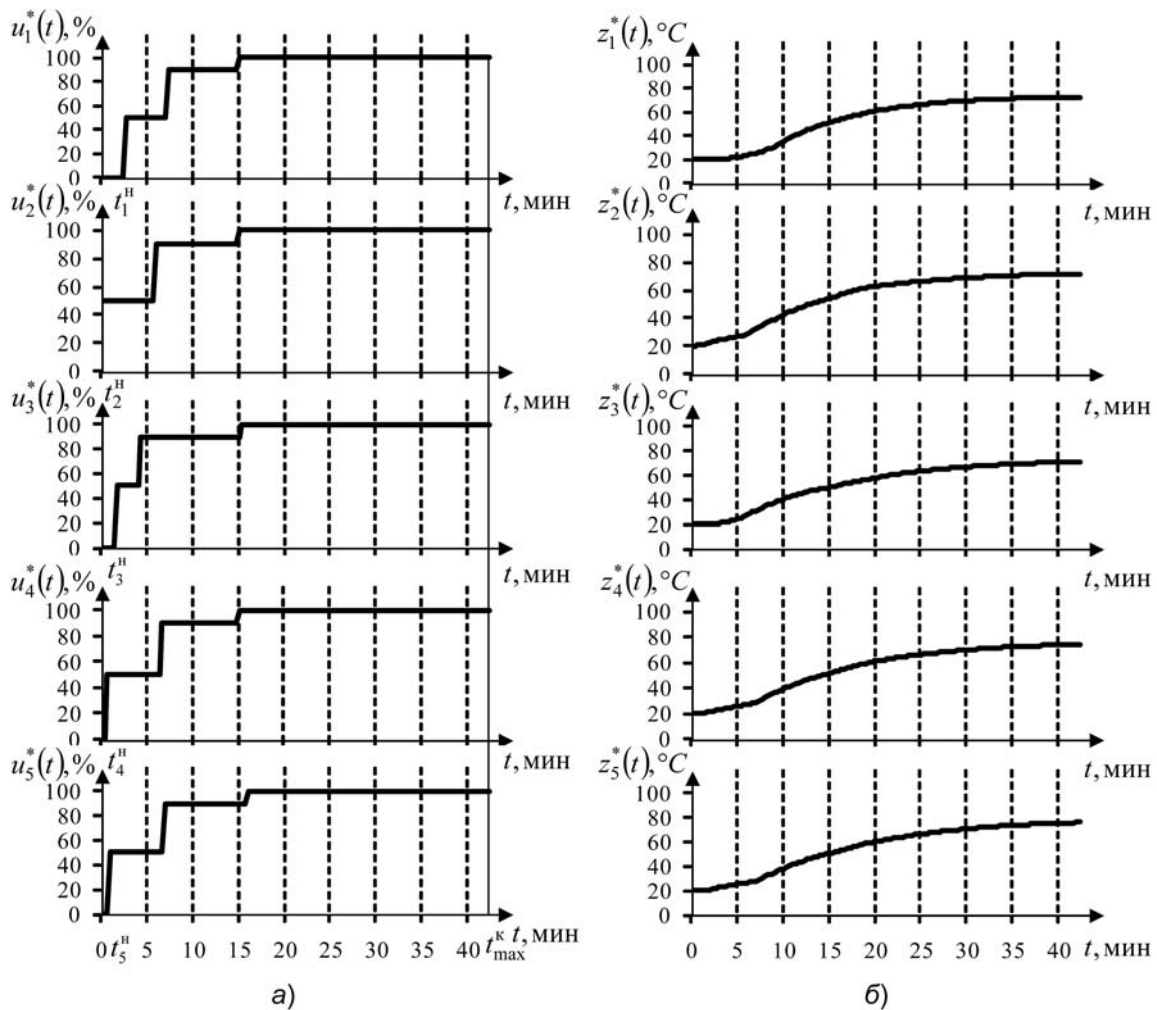


Рис. 2. Графики управляющих воздействий (а) и фазовых координат (б) для СВЛ

материала  $m$ , находящимся в камерах. Пусть вектор выходных переменных имеет вид

$$y = (\varphi_2(t_m + m\Delta t), \varphi_3(t_m + (m + 1)\Delta t), m(\varphi_5(t_m + (m + 3)\Delta t))),$$

где  $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_5$  — влажность материала во 2-й, 3-й и 5-й камерах соответственно;  $t_m$  — момент времени, в который измеряется влажность;  $\Delta t$  — время пребывания материала в камере.

В качестве элементов множества возможных траекторий изменения ситуаций (состояний функционирования) при реализации управления, т. е.

$$H = \{h_l(\cdot), l = \overline{1, L}\}, \quad (11)$$

рассматриваются отклонения значений  $y_i$  от  $\bar{y}_i$ , где  $\bar{y}_i$  — оптимальное значение влажности материала на выходе  $i$ -й камеры СВЛ. Само множество  $H$  удобно задавать в форме морфологической таблицы. Будем полагать, что элемент  $h_l(\cdot) \in H$  задается тремя компонентами, т. е.  $h_l(\cdot) = (h_{l2}, h_{l3}, h_{l5})$ , ком-

поненты  $h_{l2}, h_{l3}$  могут принимать пять значений, а компонент  $h_{l5}$  — три значения:

$$h_{li} = \begin{cases} h_{li}^{\text{ННД}}, & \text{если } y_i < (\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}); \\ h_{li}^{\text{НД}}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(2)}, \bar{y}_i - \delta_i^{(1)}]; \\ h_{li}^{\text{Д}}, & \text{если } y_i \in [\bar{y}_i - \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(1)}]; \\ h_{li}^{\text{ВД}}, & \text{если } y_i \in (\bar{y}_i + \delta_i^{(1)}, \bar{y}_i + \delta_i^{(2)}); \\ h_{li}^{\text{НВД}}, & \text{если } y_i > (\bar{y}_i + \delta_i^{(2)}), i = 2, 3; \end{cases} \quad (12)$$

$$h_{l5} = \begin{cases} h_{l5}^{\text{М}}, & \text{если } y_5 < 0,65; \\ h_{l5}^{\text{СР}}, & \text{если } y_5 \in [0,65; 0,8]; \\ h_{l5}^{\text{В}}, & \text{если } y_5 > 0,8, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\delta_i^{(1)}, \delta_i^{(2)}$  — задаваемые отклонения  $y_i$  от  $\bar{y}_i$ ,  $\delta_i^{(1)} < \delta_i^{(2)}$ ; ННД — влагосодержание материала на много ниже допустимого; НД — влагосодержание

материала ниже допустимого; Д — влагосодержание материала допустимое; ВД — влагосодержание материала выше допустимого; НВД — влагосодержание материала намного выше допустимого; М — мера доверия малая; СР — мера доверия средняя; В — мера доверия высокая. В этом случае Н содержит 75 различных ситуаций.

Рассмотрим этапы алгоритма управления процессом сушки.

*Шаг 1.* Измеряется начальная влажность  $m$ -й партии материала  $\varphi_H(t_0^m)$ .

*Шаг 2.* Измеряются значения компонентов векторов возмущающих и управляющих воздействий в процессе сушки  $m$ -й партии материала во второй секции СВЛ, соответствующие моменту времени  $t_0^m + 2\Delta t$ . Рассчитывается влажность материала во второй камере СВЛ  $\varphi_2(t_0^m + 2\Delta t)$  с использованием модели оценки влажности материала в  $i$ -й камере, представляющей собой нейронную сеть, имеющую архитектуру многослойного персептрона, обученную по алгоритму обратного распространения ошибки и имеющую вид:

$$\bar{\varphi}_i = \left[ 1 + \exp\left(-\beta_{\text{ВЫХ}}^{(i)} \left[ \sum_{j=1}^{N_i} w_j^{(i\text{ВЫХ})} \times \right. \right. \right. \\ \times (1 + \exp(-\beta_j^{(i)} [w_{1,j}^{(i)} \bar{x}_1 + w_{2,j}^{(i)} \bar{x}_2 + w_{3,j}^{(i)} \bar{x}_3 + \\ + w_{4,j}^{(i)} \bar{x}_4 + w_{5,j}^{(i)} \bar{x}_5 + w_{6,j}^{(i)} \bar{x}_6 + w_{7,j}^{(i)} \bar{x}_7 + w_{8,j}^{(i)} \bar{x}_8 + \\ \left. \left. \left. + w_{9,j}^{(i)} \bar{x}_9 + w_{10,j}^{(i)} \bar{x}_{10} \right] - \theta_j^{(i)}))^{-1} \right] - \theta_{\text{ВЫХ}}^{(i)} \right)^{-1} \right], \quad (14)$$

где  $i$  — номер камеры;  $\beta_j^{(i)}$ ,  $\beta_{\text{ВЫХ}}^{(i)}$ ,  $\theta_j^{(i)}$ ,  $\theta_{\text{ВЫХ}}^{(i)}$  — углы наклона и сдвиги сигмоидальных активационных функций нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети;  $w_{i,j}^{(n)}$ ,  $w_j^{(n\text{ВЫХ})}$  — весовые коэффициенты связей нейронов скрытого и выходного слоев нейронной сети;  $N_i$  — число нейронов в скрытом слое сети для расчета влажности материала в  $i$ -й камере сушильной установки; нормализованные значения:  $\bar{\varphi}_i$  — влажности материала;  $\bar{x}_1$  — начальной влажности материала;  $\bar{x}_2$ ,  $\bar{x}_3$  — температуры и влажности окружающей среды;  $\bar{x}_4$  — скорости движения пластинчатого конвейера;  $\bar{x}_5$  — наличия или отсутствия ворошителя;  $\bar{x}_6$  — процента времени работы вытяжного вентилятора;  $\bar{x}_7$ ,  $\bar{x}_8$  — температуры и влажности сушильного агента;  $\bar{x}_9$ ,  $\bar{x}_{10}$  — процента открытия воздухозаборного окна и сбросного шиберов. Для получения значения  $\varphi_i$  влажности материала в натуральном масштабе выходной сигнал сети денормализуется.

*Шаг 3.* Проводится проверка вхождения расчетного значения влажности материала  $\varphi_2(t_0^m + 2\Delta t)$  в допустимый интервал и коррекция процесса сушки в случае необходимости путем изменения положения воздухозаборных окон и шиберов второй секции.

*Шаг 4.* Измеряются значения компонентов векторов возмущающих и управляющих воздействий в процессе сушки  $m$ -й партии материала в третьей камере СВЛ, соответствующие моменту времени  $t_0^m + 3\Delta t$ . Рассчитывается влажность материала в третьей камере СВЛ  $\varphi_3(t_0^m + 3\Delta t)$  с использованием модели (14).

*Шаг 5.* С использованием расчетных значений влажностей материала  $\varphi_2(t_0^m + 2\Delta t)$  и  $\varphi_3(t_0^m + 3\Delta t)$  по алгоритму метода Демпстера-Шафера определяется мера доверия  $m(\varphi_K(t_0^m + 5\Delta t))$  к достижению требуемой влажности  $m$ -й партии материала на выходе сушильной установки.

*Шаг 6.* Проводится проверка вхождения рассчитанного значения влажности материала  $\varphi_3(t_0^m + 3\Delta t)$  и меры доверия  $m(\varphi_K(t_0^m + 5\Delta t))$  в допустимые интервалы. Если обе величины являются допустимыми, то корректировка процесса сушки не требуется.

*Шаг 7.* Пересчет управляющего воздействия с учетом ограничения  $\tilde{u}_0 \in U_0^{\text{доп}}$  с помощью нечеткой логики с использованием алгоритма Мамдани. Преобразование (дефаззификация) нечеткого подмножества в численное значение скорости движения ленты осуществляется тремя различными методами: центра тяжести; медианы; центра максимумов.

*Шаг 8.* Выбор оптимального управляющего воздействия с учетом функционала

$$Q = c_1(a_0 + a_1 \tilde{u}_0) + c_2(b_0 + b_1(\tilde{u}_0)^2) \rightarrow \\ \rightarrow \min_{\tilde{u}_0 \in U_0^{\text{доп}}}, \quad (15)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  — весовые коэффициенты.

Рассмотренный алгоритм управления процессом сушки в СВЛ позволяет обеспечить требуемое качество продукции и эффективность при возможных изменениях ситуаций в процессе реальной эксплуатации технологических установок.

В результате реализации синтезированного управления процессом сушки минимизируется функционал потерь качества выпускаемой продукции и производительности (15) при изменениях состояний функционирования.

Система оптимального управления процессами сушки, использующая интеллектуальный датчик для оценки влажности материала, внедрена на ОАО "Пигмент" (г. Тамбов). Ее применение позволило увеличить вероятность выхода качественной продукции до 0,98, а также повысить производительность процессов сушки на 5 %.

## Список литературы

1. **Промышленная** теплоэнергетика и теплотехника. Справочник / Под общей ред. А. В. Клименко и В. М. Зорина // Теплоэнергетика и теплотехника. Кн. 4. М.: Издательство МЭИ, 2004. 632 с.
2. **Муромцев Ю. Л., Ляпин Л. Н., Попова О. В.** Моделирование и оптимизация технических систем при изменении состояний функционирования. Воронеж: ВГУ, 1992. 164 с.
3. **Баумштейн И. П., Майзель Ю. А.** Автоматизация процессов сушки в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 232 с.
4. **Денисенко В. В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Телеком, 2009. 608 с.
5. **Петров Б. Н.** О построении и преобразовании структурных схем // Изв. АН СССР. ОТН. 1945. № 2.
6. **Райцын Т. М.** Синтез систем автоматического управления методом направленных графов. Л.: Энергия, 1970. 96 с.
7. **Месарович М., Мако Д., Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 340 с.
8. **Льюгер Джордж Ф.** Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Изд. дом "Вильямс", 2003. 864 с.
9. **Артемова С. В., Муромцев Д. Ю., Ушанев С. Б., Чернышов Н. Г.** Применение экспертной системы для оптимального управления технологическими процессами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 1997. № 1. С. 12–16.
10. **Грибков А. Н., Артемова С. В.** Алгоритм ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок // Известия Томского политехнического университета. Т. 313. 2008. № 4. С. 48–50.

УДК 681.518

**Е. Н. Тарасов**, канд. техн. наук, доц., нач. отдела,  
ФГУП "НПЦАП им. акад. Н. А. Пилюгина"  
entarasov@mail.ru

## Централизованное управление автоматизированной информационной системой

*Рассмотрены основные положения организации централизованного управления автоматизированной информационной системой со специфическими требованиями. Показаны средства реализации такого управления.*

**Ключевые слова:** автоматизированная информационная система, централизованное управление, управляющие параметры, управляющая директива, администратор системы

Назначением автоматизированной информационной системы (АИС) являются: прием, обновление, обработка и представление информации. Создание информационных систем характерно в настоящее время для большинства областей человеческой деятельности, причем каждая предметная область имеет свою специфику, свои особенности и требования. В потребительских сферах организация работы пользователей в таких системах строится по принципу — "включил и работай", вне зависимости от сложности системы, от программных и информационных ресурсов, от числа пользователей и т. д. [1]. Вместе с тем, все больше становится систем, хранящих важную, конфиденциальную информацию, обработка которой связана с высокой ответственностью за конечный результат и безопасность информации. Здесь на первый план выходит организация работы системы, исключающая ошибки, связанные с неправильными и несогласованными действиями персонала, позволяющая управлять процессом функционирования АИС и контролировать ее работу.

Для ответственных информационных систем информационное обеспечение и, конкретно, база данных (БД) должны быть защищены как ресурс, наиболее "чувствительный" к ошибкам и несогла-

сованным действиям персонала, а также к различным атакам в результате несанкционированного доступа. Помимо известных средств защиты [2] здесь могут применяться программно-организационные решения, реализуемые средствами управления работой АИС. Такие решения во многом определяются особенностями предметной области, в которой эта АИС создается, и предъявляемыми к системе требованиями.

### Централизованное управление — метод выполнения специфических требований к системе

Централизация управления информационно-вычислительными процессами в АИС предусматривает наличие в системе субъекта, осуществляющего всю полноту управления системой. При этом работа системы должна проводиться в строгом соответствии с технологией обработки информации, которая вырабатывается в процессе создания АИС, и регламентируется эксплуатационной документацией. Такой субъект — администратор системы — свою функцию управления реализует специальными программными средствами управления АИС, которые позволяют управлять информационно-вычислительными процессами в системе и контролировать работу пользователей.

Целесообразность применения централизованного управления АИС во многом вытекает из особенностей и требований к системе, где в каждом конкретном случае на первый план могут выходить свои уникальные свойства. Предпочтительным такое управление представляется для систем со следующими характерными чертами:

- АИС является многопользовательской системой, осуществляющей распределенную обработку информации на автоматизированных рабочих местах (АРМ), где пользователями системы решаются функциональные задачи обработки информации средствами прикладного программного обеспечения (ППО);
- решение информационно-вычислительных задач в АИС строится на основе строго регламентиро-

- ванной технологии, которая обеспечиваются алгоритмами управления системой и неукоснительно должна выполняться всеми пользователями;
- АИС строится на базе вычислительной сети, объединяющей несколько объектов, которые могут находиться на значительном расстоянии друг от друга, иметь в своем составе несколько АРМ, которые, в свою очередь, решают функциональные задачи, характерные для предметной области, и могут отличаться как техническими характеристиками, так и составом аппаратных средств;
  - информация в АИС хранится в централизованной базе данных (БД), которая является основным защищаемым ресурсом;
  - функции автоматизации, выполняемые АИС, предусматривают последовательное исполнение информационно-вычислительных операций средствами функциональных АРМ. Для повышения оперативности решения поставленных задач процесс обработки информации может при этом распараллеливаться путем использования нескольких однотипных функциональных АРМ;
  - при эксплуатации АИС выделяются несколько режимов работы. Режим — это комплексная характеристика, определяющая цель работы системы. Среди таковых можно назвать:
    - *регламентный режим* — проведение регламентных работ с техническими средствами (ТС) и с прикладным программным обеспечением;
    - *учебный режим* — обучение персонала, его аттестация и проведение текущих тренировок;
    - *штатный режим* — повседневное использование системы по назначению.
- Возможны и другие режимы работы системы, которые могут диктоваться предметной областью;
- АИС эксплуатируется сеансно: система включается при необходимости проведения работ (обработка информации, обучение персонала, проведение регламентных работ) и выключается после выполнения поставленной задачи либо для перерыва, после которого сеанс возобновляется для продолжения решения.

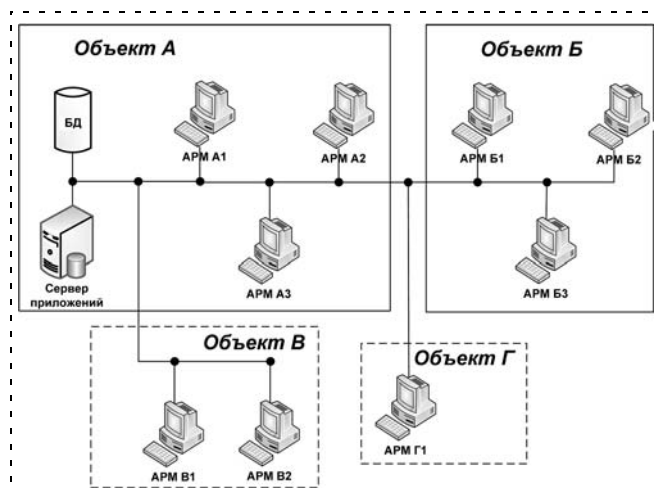


Рис. 1

Пример структурной схемы АИС такого рода представлен на рис. 1, где четыре объекта (А, Б, В, Г) объединены вычислительной сетью с централизованной базой данных и сервером приложений. На каждом объекте находятся рабочие места (АРМ) для решения функциональных задач.

### Средства реализации централизованного управления АИС

Анализ требований, предъявляемых к АИС рассматриваемого класса, показывает, что эффективное централизованное управление должно строиться на строгом упорядочивании работы системы в течение сеанса. Для этого может быть использован принцип директивного управления, когда в зависимости от целей, поставленных перед системой в сеансе, устанавливается набор управляющих параметров, определяющих следующие характеристики ее работы [4, 5]:

- режим работы системы;
- БД, с которой будут выполняться работы;
- информационно-вычислительная операция — совокупность функциональных задач, предназначенная для получения целевого результата обработки информации;
- состав объектов системы, участвующих в сеансе;
- состав рабочих мест на каждом объекте.

Все эти параметры связаны между собой определенными логическими связями. Так, например, для проведения профилактических, регламентных работ с техническими средствами (ТС) АИС база данных не нужна и может не подключаться. Для тестирования прикладного ПО должна быть использована специальная тестовая БД, которая позволит проверить работоспособность ПО на контрольных примерах, не используя штатную БД. Вместе с тем, обучение персонала, его аттестация и тренировки должны проводиться с применением учебной БД. Сохраняя структурную логическую идентичность, эти базы данных не могут быть объединены в единую базу и не могут быть использованы одновременно. Таким образом, БД в системе должна быть идентифицирована по назначению, а ее использование должно определяться целями проводимой работы.

Такой подход опирается на ряд проектных решений в создании АИС, позволяющих реализовать централизованное управление системой. Эти решения состоят в следующем:

1. Централизация вычислительных ресурсов. Включение в состав АИС сервера приложений, на котором выполняется большая часть информационно-вычислительных операций, позволяет успешно реализовать эффективное управление вычислительным процессом, уменьшить аппаратный и программный состав АИС, упростить решение задач защиты информации. Тем самым повышаются надежность и информационная безопасность системы. Наиболее подходящей в настоящее время технологией для такого решения является техноло-



гия "тонкий клиент — толстый сервер". За "клиентом" в этом случае закрепляются функции авторизации и идентификации пользователя, установления связи с сервером приложений, обеспечения диалога пользователя с системой и выдачи заданий на обработку информации. Ход выполнения решения на сервере отображается для пользователей на "клиентском" рабочем месте; туда же поступают результаты обработки, которые отображаются и документируются пользователями.

2. Использование в сеансе работы АИС только необходимых информационно-вычислительных ресурсов. Для достижения целей, поставленных в сеансе работы, следует использовать только те средства, которые для этого необходимы и определены технологией решения. Все остальные средства должны быть заблокированы централизованным управлением системой. Это позволяет избежать ошибок в работе, повысить надежность системы, повысить защищенность информационных ресурсов, так как любая попытка начать работать с рабочего места, не имеющего соответствующих полномочий со стороны центрального управления, будет рассматриваться как попытка несанкционированного доступа.

3. Трансформация системы в зависимости от состава решаемых задач. Сеанс работы системы характеризуется решением конкретного набора операций, которые, в свою очередь, требуют подключения соответствующих технических средств, программного и информационного обеспечения (БД). В то же время, для каждого конкретного набора задач, составляющих операцию, существует своя конфигурация системы, и для перехода к работе с другим набором задач система должна, в общем случае, изменить конфигурацию, т. е. трансформироваться. Нетрудно видеть, что конфигурация системы определяется режимом работы, составом решаемых задач, информационным обеспечением (БД), используемым для работы составом объектов и АРМ системы, т. е. тем, что определено ранее как управляющие параметры. Изменение одного или нескольких из них приводит к трансформации системы. Это может происходить, в том числе, и в течение одного сеанса. В этом случае управление процессом должно обеспечить завершение работы системы в рамках действующей операции, реализовать новый набор управляющих параметров и осуществить изменение конфигурации системы для реализации операции с новым набором решаемых задач.

Сказанное выше относится к трансформации системы в условиях штатной работы, когда изменение конфигурации определяется условиями работы. В то же время, при рассматриваемой организации централизованного управления системой ее можно трансформировать для решения поставленных задач в условиях выхода из строя отдельных АРМ или других технических средств. В этом случае решение ряда задач переносится с "отказавших" АРМ на те, которые либо не задействованы в текущем сеансе, либо загружены недостаточно ин-

тенсивно. Технология "тонкий клиент — толстый сервер" хорошо приспособлена для подобных действий, и перенесение логического АРМ на физическое рабочее место, или совмещение нескольких логических АРМ на одном физическом, здесь не составляет большого труда. Очевидно, что применение такой трансформации системы повышает ее надежность и живучесть [5].

#### **Администратор АИС — функциональный пользователь с высшим приоритетом**

Как уже отмечалось выше, главная роль в централизованном управлении АИС отводится администратору системы и средствам управления информационно-вычислительными процессами, которые необходимы для осуществления функций управления. В зависимости от ставящихся перед системой в сеансе целей, от решаемых задач, от наличия персонала и работоспособных технических средств (ТС), а также от возможных ситуационных изменений, которые могут произойти в ходе сеанса (например, необходимости перехода из учебного режима работы в штатный), администратор должен иметь возможность:

- задать согласно технологии обработки информации облик решения полученного задания в виде набора управляющих параметров;
- изменить этот облик путем задания новых значений управляющих параметров: режима, БД, информационно-вычислительных процедур, конфигурации системы и пр.;
- завершить работу системы.

Администратор системы имеет высший приоритет функционального пользователя. Реализация его функций обеспечивается соответствующим рабочим местом и специальными программными средствами, которые реализуют централизованное управление системой в рамках технологии "тонкий клиент — толстый сервер".

Управление АИС, основанное на применении наборов управляющих параметров (управляющих директив), рассматривалось в ряде работ [3—6]. Как уже указывалось выше, оно предусматривает задание администратором системы на сеанс работы набора управляющих параметров. Сформировав директиву, администратор запускает управляющее программное обеспечение, которое должно позволять:

- установить необходимые логические признаки для работы системы (режим, операция, задача и пр.);
- смонтировать, если она используется, нужную БД;
- подключить в соответствии с конфигурацией системы рабочие места ("клиентов") к серверу приложений;
- запустить сеанс работы АИС;
- отслеживать работу "клиентов" в системе;
- изменять текущую управляющую директиву;
- завершать сеанс работы АИС.

В процессе выполнения операции и входящих в нее задач проводится обмен информацией между

№ п/п	Режим	Операция	БД	Задача	Конфигурация
1	Регламентный	Регламент ТС	Нет	Регламент АРМ	Все АРМ
2	Учебный	Ведение БД	Нет	Актуализация справочников	АРМ А1 (адм), АРМ А2
3	Штатный	Обработка данных	Штатная	Планирование работ	АРМ А1 (адм), АРМ А3
4	Штатный	Обработка данных	Штатная	Обработка данных, печать документов	АРМ А1 (адм), АРМ А3, АРМ Б1, АРМ Б2, АРМ Г1

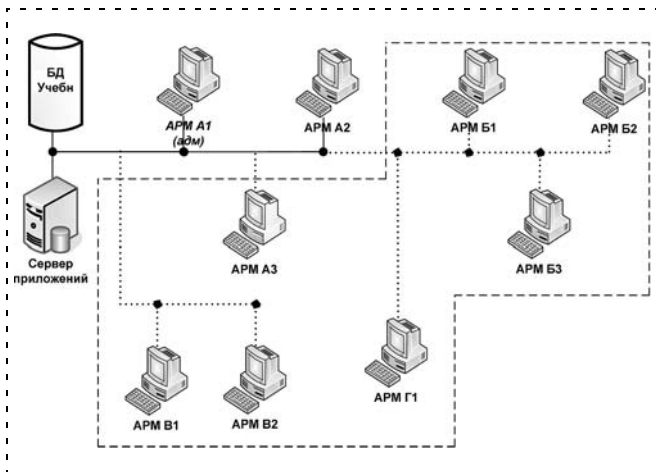


Рис. 2

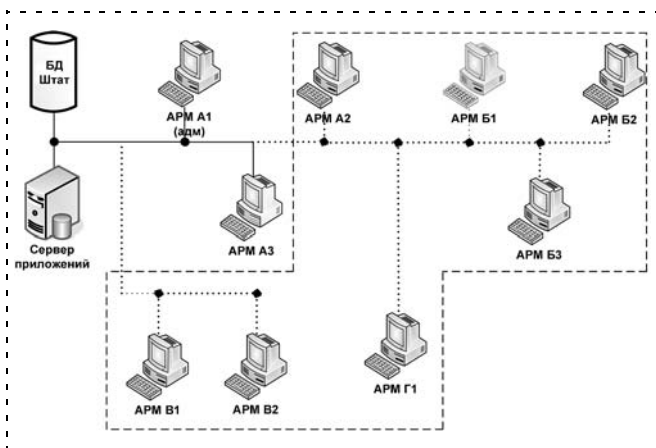


Рис. 3

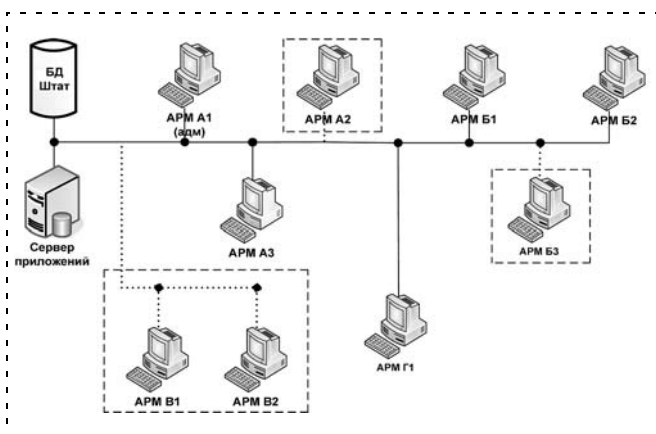


Рис. 4

"клиентским" ПО и управляющим ПО администратора. В результате он получает в реальном времени представление о ходе вычислительного процесса, завершения задач, запуске новых, возникших сбоях в работе и т. д.

После завершения операции администратор либо продолжает сеанс, задавая следующую операцию на исполнение, сформировав новую директиву, либо заканчивает работу системы, выдавая соответствующую директиву конца сеанса.

В таблице приведены примеры управляющих параметров некоторых характерных директив АИС, функциональная схема которой приведена на рис. 1. На рис. 2, 3 и 4 показаны конфигурации системы для директив 2, 3, 4 из этой таблицы. Штриховой линией на этих рисунках показаны рабочие места АИС, исключаемые из работы в сеансе согласно приведенным управляющим директивам.

### Выводы

Для АИС, предназначенных для обработки ответственной информации и имеющих специфические свойства и требования, предпочтительным является централизованное управление, использующее метод управляющих директив (наборов управляющих параметров). Главная роль в таком управлении отводится администратору системы, имеющему высший приоритет функционального пользователя, инструментом которого являются программные средства управления информационно-вычислительным процессом в системе.

### Список литературы

- Советов Б. Я., Цехановский В. В. Информационные технологии. М.: Высшая школа, 2003. 263 с.
- Домарев В. В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты. К.: ООО "ТИД "ДС", 2001. 688 с.
- Тарасов Е. Н., Румянцев Т. Н., Фурман В. Д. Концепция построения информационных автоматизированных систем директивного типа // Известия ТРТУ. Тем. вып. Перспективные системы и задачи управления. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. № 3 (58). 317 с.
- Тарасов Е. Н., Васенькина Н. Н., Ивлиев Р. С. Использование управляющих параметров в автоматизированных информационных системах директивного типа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 6.
- Ивлиев Р. С., Тарасов Е. Н. Организация вычислительного процесса распределенной обработки информации в локально-вычислительных сетях с "тонким клиентом" и сервером // Труды ФГУП НПЦ АП. Науч.-техн. сб. Вып. 1. Ч. 1. 2006. 91 с.
- Тарасов Е. Н., Румянцев Г. Н., Фурман В. Д. Организация работы автоматизированной информационной системы с централизованным управлением // Междунар. науч.-техн. конф. "Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами", посвященная 100-летию со дня рождения академика Н. А. Пилюгина. М.: ООО "Научно-издательский центр \*Инженер\*", 2008. 284 с.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.711.712.713;004.8:

**И. Ф. Чебурахин**, д-р техн. наук, проф.,  
МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского,  
**В. И. Цурков**, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
зав. отделом ВЦ РАН  
cybernetics@mati.ru

## Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов\*

*Предлагается программно и аппаратно реализуемая обработка логической информации для автоматизированных информационных управляющих систем. Особенностью подхода является разработка алгоритмов для непрямых методов вычисления произвольной булевой функции в разных базисах, основывающихся на декомпозиции, классификации множества булевых функций и кодирования. Определяются методы минимизации программ по числу исполняемых операций, которые учитываются в основных алгоритмах. Другой особенностью подхода является направленность на возможное распараллеливание вычислений. Алгоритмы соответствующим образом преобразуются, облегчая в дальнейшем программирование для систем с многоядерными процессорами.*

**Ключевые слова:** информационные агентные системы и технологии, многоядерный процессор, булевы функции, синтез формул и схем, декомпозиция, сложность, показатели качества, минимизация, кодирование

### Введение

В статье рассматриваются задачи анализа и синтеза оптимальных дискретных логических устройств обработки информации и управления. Математическими моделями для них, в первую очередь, являются логические (булевы) функции и схемы из функциональных элементов (ФЭ). Поэтому, особенно не вдаваясь в детали, будем выделять алгоритмы логического управления (точнее, с них начинать) и обработки информации (АЛУиОИ, или, коротко, АЛУ). Они широко востребованы в областях, связанных с наукой и образованием, а также с космосом, энергетикой, транспортом, робототехникой и др. Следует особо отметить область приложений — мехатронных систем. В качестве других моделей для рассматриваемого синтеза используются также модели конечных автоматов, графов, кодов и другие средства дискретной математики.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-01-90441 Укр Ф.

Таким образом, статья посвящена различным вопросам программной и аппаратной реализации АЛУ, для которой практическую ценность имеет высказывание Ж. Пьяже: "... операции классификации представляют собой новый вклад в логику классов и отношений ...".

Можно сказать, что разного типа ЭВМ фактически являются универсальными преобразователями информации и управления технологическими процессами и объектами с возможностями минимизации показателей качества и требуемых вычислительных ресурсов. Использование их, в общем случае, может оказаться неэффективным (по крайней мере, с экономических позиций, но и при этом сохраняется важность и интерес к быстродействию, надежности и др.). Поэтому задача синтеза высококачественных и дешевых АЛУ сохраняет актуальность. Проектирование АЛУ, а тем более оптимальных по различным показателям качества, относится к классу трудно-формализуемых задач, для которых, как правило, отсутствуют точные алгоритмы решения, а для методов перебора получается астрономически большое число возможных вариантов решения, подлежащих анализу.

В связи с этим, отвечая растущим потребностям в информационных и вычислительных ресурсах в образовании, науке и технике, в работах [1, 2] достаточно подробно и полно излагается перспективный подход к решению таких задач на основе агентных технологий. В последнее время одно из направлений искусственного интеллекта (ИИ) включает в себя исследования с названием *многоагентные системы* (МАС). Это направление возникло в 60-е годы прошлого столетия на основе экспертных систем с намерениями упрощения, облегчения общения пользователя с компьютером и более полного использования многопроцессорных вычислительных и управляющих систем (МВУС).

Ниже используются следующие обозначения:  $\lceil x \rceil$  — наименьшее целое, не меньшее числа  $x$ ;  $\&$  — логическое умножение; знак точка ( $\cdot$  точка) в зависимости от смысла понимается или как логическое или как арифметическое умножение. В записи формул для простоты иногда внешние скобки опускаем.

### Агентные технологии

На наш взгляд, метод МАС на основе теории систем (методов декомпозиции, классификации, структуризации и др.) позволяет сводить решение трудноформализуемых задач к решению системы

взаимосвязанных упрощенных задач. Решение этих задач достигается, как правило, с помощью специальных программ, в том числе рекурсивных, разработка которых все больше становится искусством программирования.

Программист наделяется новыми средствами и знаниями (от аналитика, эксперта, пользователя) решения задачи в своей проблемной области. Свою интуицию, опыт, знания он (они) пытается формализовать и включить в алгоритм и программу. В итоге, созданная программа успешно применяется пользователем (заменяет человека при решении соответствующих задач).

Сложность архитектуры и многообразие компонентов каждого отдельного агента, сложность структуры и разнообразие вариантов взаимодействия агентов между собой вносят свой вклад в классификацию, названия, обозначения и функции понятия *агент* [1–8]. В зависимости от предметной области и задачи условно различают следующие типы агентов:

- экспертная система (ЭС), являющаяся предшественником агентов, — мобильная, системная, поисковая программа, независимый исполняемый модуль (".exe"), мобильный, системный, интеллектуальный агент, программная система [3];
- программный, внутренний, внешний, сетевой агент [4];
- планирующий, автономный, интеллектуальный агент, персональный ассистент, электронный секретарь, компьютерный посредник [5, 6];
- программный агент [7, 8].

В данной статье агент — это универсальная (в отведенных рамках), управляющая программа для синтеза определенного класса алгоритмов логического управления.

Агент может:

- связываться с пользователем для получения инструкций и обеспечения пользователя результатами; контролировать состояние своей окружающей среды и при необходимости предпринимать действия на выполнение им задачи; может обмениваться информацией, сотрудничать, для достижения некоторой цели [1–4].

Актуальные области применения агентов:

- коммуникационные технологии;
- компьютерные сети, глобальные телекоммуникационные системы [1–8].

### Реализация АЛУ

Итак, будем рассматривать программную (в основе) и обсуждать аппаратную реализацию АЛУ, который определяется системой булевых функций (БФ)  $y_i = f_i^{(n)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $1 \leq i \leq p$ . Считаем, что система булевых функций задает определенный закон обработки информации, алгоритм управления. Сами булевы функции задаются булевыми формулами в разных базисах различными способами. Для программной реализации АЛУ, априори, ра-

зумно доступны все реальные средства программирования, а для аппаратной — цифровые интегральные схемы. Правила записи формул определяются ниже [9–13].

При программной реализации АЛУ возможно использование многопроцессорных вычислительных и управляющих систем (МВУС). Если число функций в АЛУ меньше числа процессоров МВУС, то каждому процессору сопоставляется своя вычисляемая функция (или некоторая элементарная конъюнкция — ЭК). Фактически, применяем метод распараллеливания АЛУ. Поэтому достаточно получить методы программной реализации одной булевой функции из их множества, а аппаратная реализация выполняется для каждой БФ. Это недостаток аппаратной реализации.

При использовании для синтеза аппаратных средств берутся логические элементы, соответствующие функциям базиса  $G = \{g_i, | i = 1, 2, \dots, k\}$ . В теоретических исследованиях и приложениях часто рассматривают базисы  $G_1 = \{\&, \vee, \neg\}$  и  $G_3 = \{\&, \oplus, 1\}$  для множества всех булевых функций и  $G_2 = \{\&, \vee\}$  — для монотонных функций [9–13].

В работе [14] предлагается аппаратно построить управляющее устройство на основе функциональных уравнений (ФУ) для отдельных счетных классов булевых функций, таких как  $\&, \vee, \oplus, \sim$  и других, но его синтез эффективнее сочетать с программными средствами (реализуя лишь схемно одну итерацию, рис. 1, 2), к рассмотрению которых переходим.

Рассмотрим задачу синтеза устройства обработки информации, сводящуюся к реализации системы

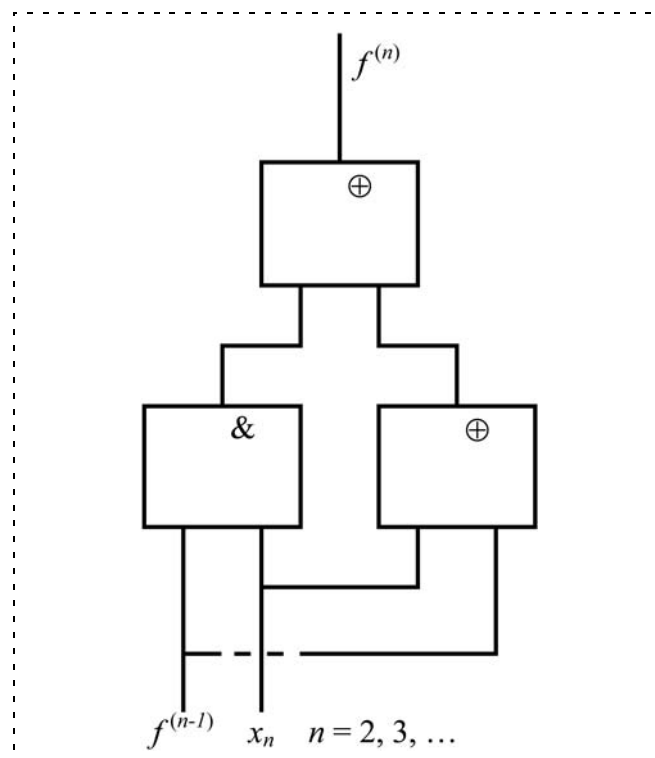


Рис. 1. Фрагмент логической схемы для одной итерации ( $n$ -мостной дизъюнкции) в базисе  $G_3$

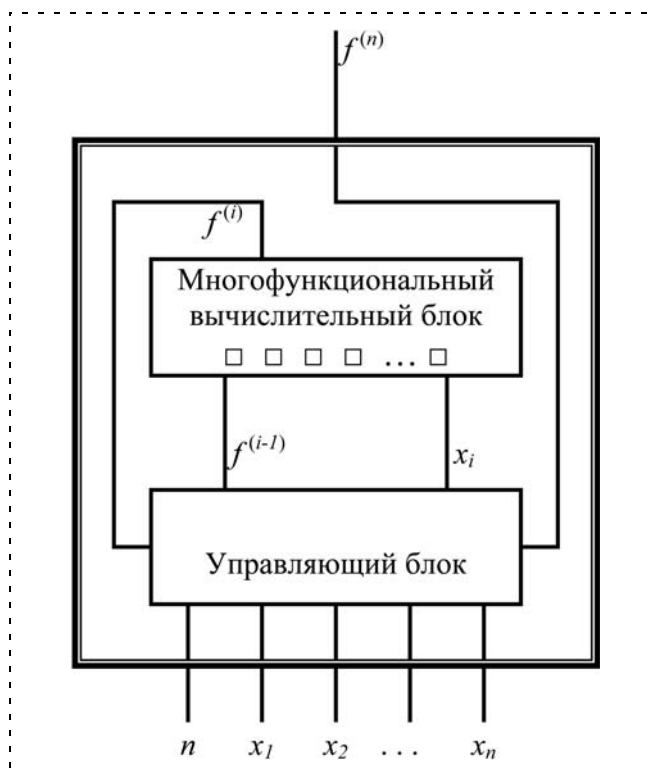


Рис. 2. Экономная (по числу ЛЭ) логическая схема, реализующая  $n$ -местную дизъюнкцию в базисе  $G_3$

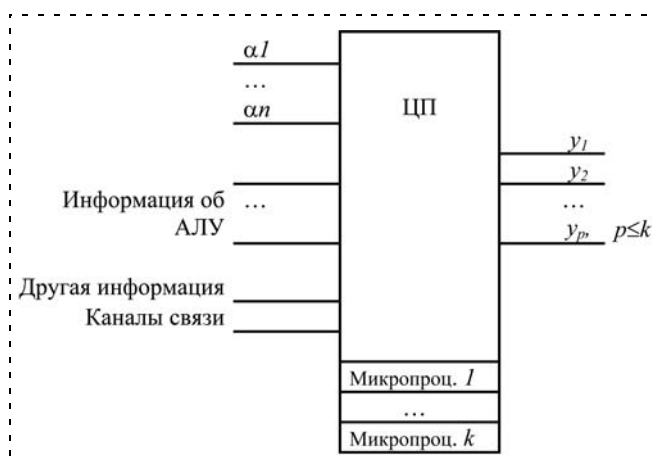


Рис. 3. Условное представление структуры АЛУ

булевых формул  $F_i^{(n)}$  программой в соответствующем базисе  $G$  [14]. Общая схема этой реализации показана на рис. 3.

При этом будем применять три способа представления формулы  $F^{(n)}$  в базисе  $G$ :

- суперпозиционная формула (скобочная формула, и порядок вычисления в ней полностью определен, например, с помощью ФУ);
- формула, характеризующаяся определенным строением (типа ДНФ, полинома Жегалкина и др.);
- формула смешанного типа.

В первом случае формулу надо просто расписать в командах центрального процессора (ЦП). Во втором

случае, как было сказано выше, на основе классических методов, а также эвристики и естественного логического вывода для каждой формулы такого типа могут быть сформулированы правила упрощения вычислений, применяемые также для третьего случая.

Рассмотрим принципиальный выбор технологии реализации булевой формулы. Схемная реализация может быть эффективной в тех случаях, когда формула — АЛУ — не меняется. Если алгоритм задается разными формулами в зависимости от выполнения— невыполнения определенных условий, то при реализации такого алгоритма можно в широком диапазоне включать программирование. Но если в формулу входят подформулы разного типа, то эффективно комбинировать подходы к реализации. В работах [9—13, 15—18] в целях минимизации показателей качества аппаратной или программной реализации предлагаются эквивалентные преобразования булевых формул (возможное приведение к скобочному виду и др.).

### Вычисление булевых формул в разных базисах непрямыми методами

С учетом того, что полином Жегалкина в теории булевых функций играет особую роль, полезно выбрать его в качестве начальной, основной (универсальной) математической модели для АЛУ. Возможны и другие, частные модели. Для класса монотонных булевых функций такими являются монотонные ДНФ. Эти модели используются в предлагаемых ниже алгоритмах 1 и 2 вычисления булевой функции из соответствующего класса. Для множества булевых функций  $f^{(n)}$ , зависящих от  $n$  переменных, в стандартном базисе  $G_1$  использование ДНФ приводит, в общем случае, к усложнению требуемых вычислений.

С учетом того, что полином Жегалкина в теории булевых функций играет особую роль, для начала выберем его в качестве математической модели для АЛУ. Итак, рассматриваем математическую модель — полином Жегалкина. Будем использовать следующие обозначения [15—23]:

произвольная булева функция  $f^{(n)}(X)$  задается полиномом Жегалкина  $F^{(n)} = K_1 \oplus K_2 \oplus \dots \oplus K_m$  в базисе  $G_3 = \{\&, \oplus, 1\}$ , где

$n$  — число переменных,

$m$  — длина полинома Жегалкина;

$K_i$  — монотонная ЭК (элементарная конъюнкция) ранга  $r_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ ;

$\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m)$  — вектор рангов полинома, причем для определенности и упрощения выводов считаем, что выполняются неравенства  $r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_m$ ;

$L_6 = \sum_{i=1}^m r_i$  — число букв в формуле  $F^{(n)}$ ;

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n\}$  — множество булевых переменных.

**Замечание 1.** При разработке ниже алгоритма 1 (и 2) в целях автоматизации вычисления булевой

формулы на основе ее компьютерного описания полезно предварительно установить связи (отображения) между данными в формализованном представлении формулы  $F^{(n)}$ . Это потребуется при вычислении формулы, а также для минимизации вычислительной сложности.

Для алгоритма формализация представления булевой формулы предусматривает важный элемент — упорядоченный список переменных, составляющих формулу (СПСФ)  $F^{(n)}$  [17]:

$$F_{\text{СПСФ}} = (x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,r_1}, x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,r_2}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{m,1}, x_{m,2}, \dots, x_{m,r_m}). \quad (1)$$

Первый индекс буквы есть номер  $i \in K$   $K_i$ , а второй — номер  $j$ ,  $1 \leq j \leq r_i$ , буквы в той же  $\in K$   $K_i$ , т. е.  $x_{i,j}$ . Запятую можно опускать, получая в определенном смысле эквивалентную запись:

$$F_{\text{СПСФ}} = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1r_1}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2r_2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mrm}). \quad (2)$$

Тогда индекс  $ij$  обозначает номер буквы в списке (1) или (2), т. е.  $ij \in \{1, 2, \dots, L_6\}$ . Для программы непрямого вычисления формулы, продолжая формализацию, получаем список соответствующих индексов (ССИ) (ниже в примере поясняется):

$$F_{\text{ССИ}} = (11, 12, \dots, 1r_1, 21, 22, \dots, 2r_2, \dots, ij, \dots, m1, m2, \dots, mrm), \quad (3)$$

т. е.  $F_{\text{ССИ}}$  представляет список индексов переменных, соответствующих упорядоченному списку переменных, составляющих формулу  $F^{(n)}$ .

Аналогично получаем для множества  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n\}$  переменных (идентификаторов для алгоритма, ИА)

$$X_{\text{ИА}} = \{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n\} \quad (4)$$

и для списка его индексов

$$X_{\text{ССИ}} = (1, 2, \dots, p, \dots, n). \quad (5)$$

Тогда  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$  — список значений переменных,  $\alpha_p \in \{0, 1\}$ , и список его индексов совпадает с (5) (на основе биекции:  $x_p \leftrightarrow \alpha_p$ ,  $1 \leq p \leq n$ ). Для переменных списка (4) или (5) необходимо получить управляющие сигналы и подсчитать для списка  $\alpha$  формулу  $F^{(n)}$ .

При записи формулы  $F^{(n)}$  придерживаемся следующих правил (различных для алгоритма и программы) [9]:

1) если в алгоритме записываем  $x_p$ , то в программе соответствующий идентификатор может быть, например,  $xp$  или, для уменьшения вычислительной сложности (эффektивнее),  $p$ , т. е.

$$\begin{aligned} x_p &= xp \rightarrow p; \\ x_1 &= x1 \rightarrow 1; \\ x_2 &= x2 \rightarrow 2 \dots; \end{aligned}$$

2) аналогично для алгоритма, если переменная  $x_{ij}$  входит в  $\in K$   $K_i$ , занимая в ней позицию  $j$ , то ее

номер в  $F_{\text{ССИ}}$  (3) обозначаем  $ij$ , но для программы применяем следующую формализацию

$$x_{ij} = xij \rightarrow ij.$$

При этом между упорядоченным множеством переменных  $X$  и множеством значений переменных  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$  (а также множеством их индексов  $X_{\text{ССИ}}$ ) используется биекция, позволяющая упрощать логический вывод. Также применяется сюръективное (на) отображение  $\varphi: F_{\text{ССИ}} \rightarrow X_{\text{ССИ}}$  (т. е. (3)  $\rightarrow$  (5)).

Заметим, что  $n, m, r_i = ri, i, j, ij, \alpha_p = \alpha p$  — идентификаторы, используемые в алгоритме и далее в программе (также константы  $1, 2, 3, \dots, n$ ).

Этого (до (2) включительно) описания формулы  $F^{(n)}$  достаточно для ее вычисления на каждом наборе  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$  значений переменных множества  $X$ , так называемым, непрямым методом.

Ввиду того, что, как было сказано, задача трудноформализуема, некоторые шаги в ее решении осуществляются эвристически или на основе естественного логического ввода, дополняемого полезным расширением понятий (2)—(5) и кодирования. Это позволяет сформулировать основную идею, реализуемую в алгоритме 1: организуется цикл (параметр цикла  $ij$ ,  $1 \leq ij \leq L_6$ ) по элементам (переменным) списка (1). Затем, используя сюръекцию  $\varphi: F_{\text{ССИ}} \rightarrow X_{\text{ССИ}}$  и биекцию  $\psi: X_{\text{ССИ}} \rightarrow (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$ , схематично можно записать  $ij \rightarrow x_{ij} \rightarrow x_p \rightarrow p \rightarrow \alpha_p$  (на диаграмме (рис. 4) полные действия для упрощаемого способа отмечены штриховой линией), но с использованием (3) индекс для  $\alpha_p$  находится по укороченной цепочке (сразу), т. е.  $ij \rightarrow p$  (сокращение полных действий), и далее анализируется  $\alpha_p \in \{0, 1\}$ .

Фактически на диаграмме получаем переход не по штриховой линии, а по непрерывной, сокращая вычислительную сложность.

Заметим, что  $ij$  есть номер позиции некоторой булевой переменной (буквы) в (2) (самих индексов переменных в (3)).

Трудоёмкость алгоритма — число элементарных операций из множества заданных, выполненных при его вычислении. Используемые операции: сложение (арифметические и логические); условная операция (Если <логическое условие> то <операции>), в которой проверка условия есть отдельная операция; операция безусловного перехода. При этом символ ; (точка с запятой) означает конец записи операции.

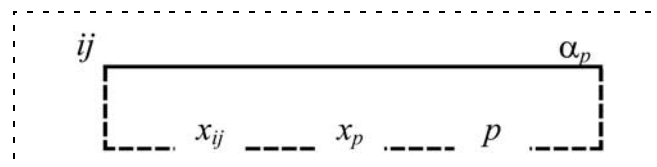


Рис. 4. Графическая иллюстрация вычисления булевой формулы двумя способами

Таблица 1

№ шага	Операция	Пояснение	Оценки числа операций $L_{оп}$
1	$F_n := 0;$ $i := 0;$ $R := 0$	$F_n$ — искомая величина. Присвоение начальных значений и начало вычислений	3
2	$j := 0;$ $i := i + 1$		$\leq 2m$
3	$j := j + 1;$ $ij := R + j;$ $p := F_{ССИ}(ij)$	Осуществляем отображение $ij \rightarrow p \rightarrow \alpha_p = \alpha(p)$	$\leq 3L_6$
4	Если $\alpha_p = 0$ , то $\langle R := R + r_i; \text{Перейти к шагу 2} \rangle;$ Если $j < r_i$ , то $\langle \text{Перейти к шагу 3} \rangle;$ $R := R + r_i;$ $F_n := F_n \oplus 1;$ Если $i \neq m$ , то $\langle \text{Перейти к шагу 2} \rangle$	$\alpha_p = \alpha(p) = \alpha_p;$ $R := R + r_i$ Или выполняются эти две операции, или следующая проверка условия $j < r_i$ $R := R + r_i$ <i>Логическая операция</i>	$\leq 3L_6$  $\leq m$ $\leq m$ $\leq 2m$
5	$F^{(n)}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n) := F_n$	Вычисление закончено	1
Итого:		$L_{оп} \leq 6L_6 + 6m + 4$	

Опишем **алгоритм 1** (табл. 1) вычисления определенной булевой формулы в базе  $G_3 = \{\&, \oplus, 1\}$ .

Исходные данные для алгоритма 1 (пояснены выше):  $n, m, \mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m), F_{ССИ}$  — см. (3),  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n), \alpha_p \in \{0, 1\}$ , применяем обозначение  $F_n$  для  $F^{(n)}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$ .

**Основное правило минимизации** (явной и неявной) работы алгоритма 1 по числу операций (времени): вычисление начинается со старшей (первой) ЭК  $K_1$  и далее продолжается по порядку, установленному в формуле; если для переменной  $x_p$  некоторой ЭК ее значение  $\alpha_p = 0$ , то закончить процесс вычисления текущей ЭК и осуществить переход к вычислению следующей ЭК. При переходе к следующей ЭК пропускается набор оставшихся переменных. Смотри также замечание 1.

Сложность вычисления формулы по времени можно оценить следующим образом:

$$T_{вр.выч} = t_{ср.вр.оп} L_{оп}(f^{(n)}, G_3) \leq t_{ср.вр.оп}(6L_6 + 6m + 4).$$

**Пример 1.** Вычислить полином

$$F^{(3)} = K_1 \oplus K_2 \oplus K_3 \oplus K_4 = x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_2 \oplus x_2 x_3 \oplus x_3$$

на наборе  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0, 1, 1)$  значений переменных упорядоченного множества  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ .

Для программы получаем данные:

$$X_{ССИ} = (1, 2, 3), x_p \in X, p \in \{1, 2, 3\},$$

$$m = 4,$$

$$\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3, r_4) = (3, 2, 2, 1)$$

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0, 1, 1), \alpha_i \in \{0, 1\}.$$

Формализуя список переменных (букв), составляющих формулу  $F_{СПСФ} = (x_1, x_2, x_3; x_1, x_2; x_2, x_3; x_3)$ , получаем

Список-набор соответствующих индексов

$F_{ССИ} = (1, 2, 3; 1, 2; 2, 3; 3)$ . Заметим, что в алгоритме 1 устраиваются циклы именно по элементам этого списка.

Тогда для  $\alpha = (0, 1, 1)$  по алгоритму 1 получаем  $f^{(3)}(0, 1, 1) = F^{(3)}(0, 1, 1) = 1 \oplus 1 = 0$ , и так далее для произвольных  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ . Центральный процессор принимает результат и отправляет его на выход программы для дальнейших действий (или следующий этап обработки информации).

**Алгоритм 2** вычисления монотонной булевой формулы (в базе  $G_2 = \{\&, \vee\}$ ). Исходные данные для алгоритма 2: монотонная булева функция  $f^{(n)}$  задается дизъюнктивной нормальной формой (ДНФ)  $F^{(n)} = K_1 \vee K_2 \vee \dots \vee K_m$  в базе  $G_2 = \{\&, \vee\}$ , где  $n, m, \mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_m), F_{ССИ}$  — см. (3),  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n), \alpha_p \in \{0, 1\}$ . Применяем обозначение  $F_n = F^{(n)}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$ , другие пояснения в алгоритме даются в фигурных скобках.

**Основные правила минимизации** (явной и неявной) работы алгоритма по времени:

- вычисление начинается с младшей (последней) ЭК  $K_m$  (цикл с последней ее переменной), и ее значение 1 (и формулы  $F^{(n)}$ ) для отдельных случаев может достигаться быстрее;
- если в ЭК  $K_i, 1 \leq i \leq m$ , для переменной  $x_p$  значение  $\alpha_p = 0$ , то вычисление текущей ЭК  $K_i$  закончено со значением 0, и осуществляется переход к вычислению следующей ЭК;
- если для некоторой ЭК  $K_i$  получаем значение, равное 1, то вычисление формулы  $F^{(n)}$  заканчиваем со значением 1.

Шаг 1.  $F_n := 0;$

$$i := m;$$

$$L_6 := \sum_{i=1}^m r_i \quad \{\text{оценка } L_{оп} = m + 2\}$$

$$ij := L_6;$$

Шаг 2.  $j := r_i; \quad \{\text{оценка } L_{оп} \leq m + 1\}$

Шаг 3.  $p := F_{ССИ}(ij); \quad \{\text{оценка } L_{оп} \leq L_6\}$

Шаг 4. Если  $\alpha_p = 0$  то  $\{\text{оценка } L_{оп} \leq 7L_6 + 1\}$

$\langle ij := ij - j; \{\text{вычитается число переменных, оставшихся от ЭК}\}$

$$i := i - 1;$$

Перейти к Шагу 2 >;

Если  $ij = 0$  то < Перейти к Шагу 5 >;

Если  $r_i = 1$  то < Перейти к Шагу 5 >;

Если  $j = 0$  то < Перейти к Шагу 5 >;

$$ij := ij - 1;$$

$$j := j - 1;$$

Перейти к шагу 3;

Шаг 5.  $F_n := 1;$

$$F^{(n)}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n) := F_n.$$

**Конец алгоритма.**

Сложность программы, как правило, характеризуется следующими показателями: число команд в тексте; объем промежуточной записи; время вычисления.

Для алгоритма 2 сложность  $L_{\text{оп}}(f^{(n)}, G_3) \leq 8L_6 + 2m + 4$ .

Оценка сложности вычисления формулы  $F^{(n)}$  по времени:

$$T_{\text{вр.выч}} = t_{\text{ср.вр.оп}} L_{\text{оп}}(f^{(n)}, G_3) \leq t_{\text{ср.вр.оп}}(8L_6 + 2m + 4).$$

Имеются методы вычисления булевых функций с помощью операторных и бинарных программ, сложность которых по числу команд характеризуется асимптотической оценкой  $2^n/n$  [13]. Они используют другие системы базисных команд, что затрудняет их сравнение по другим показателям.

### Таблицы для симметрических полиномов Жегалкина

Симметрические булевы функции — класс функций, для которого находятся приложения в проектировании дискретных логических устройств обработки информации и управления. Его изучение справедливо представляет практический интерес.

Симметрические полиномы Жегалкина  $F_i^{(n)}$  ( $n$  — число переменных,  $i$  — степень полинома  $1 \leq i \leq n$ ,  $n \geq 2$ ) можно автоматизированно получать с помощью табл. 2 и использовать при синтезе схем из ФЭ, а также применять при создании определенной базы данных [20—22].

Пусть для симметрического полинома Жегалкина  $F_i^{(n)}$  построена табл. 2 с  $n$  строками, числом столбцов  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Первый и последний элементы строки всегда определены как функции счетных классов  $F_1^{(n)}$  и  $F_n^{(n)}$  (уже исследованных). Получаем со 2-го по  $n$ -й элементы (полиномы Жегалкина)

Таблица 2

$n$ — число пере- менных	Полиномы Жегалкина $F_i^{(n)}$ , $i = 1, 2, \dots, n$					
	$F_1^{(n)}$	$F_2^{(n)}$	$F_3^{(n)}$	$F_4^{(n)}$	$F_5^{(n)}$	$F_6^{(n)}$
2	$F_1^{(2)}$	$F_2^{(2)}$				
3	$F_1^{(3)}$	$F_2^{(3)}$	$F_3^{(3)}$			
4	$F_1^{(4)}$	$F_2^{(4)}$	$F_3^{(4)}$	$F_4^{(4)}$		
5	$F_1^{(5)}$	$F_2^{(5)}$	$F_3^{(5)}$	$F_4^{(5)}$	$F_5^{(5)}$	
6	$F_1^{(6)}$	$F_2^{(6)}$	$F_3^{(6)}$	$F_4^{(6)}$	$F_5^{(6)}$	$F_6^{(6)}$
7	$F_1^{(7)}$	$F_2^{(7)}$	$F_3^{(7)}$	$F_4^{(7)}$	$F_5^{(7)}$	$F_6^{(7)}$
...	...	...	...	...	...	...
$n$	$F_1^{(n)}$	$F_2^{(n)}$	$F_3^{(n)}$	$F_4^{(n)}$	$F_5^{(n)}$	$F_6^{(n)}$
$n + 1$			$F_3^{(n+1)}$			

строки с номером  $n + 1$  по правилу 1 (см. выделенный фрагмент табл. 2, меняющийся в зависимости от степени  $i$  полинома Жегалкина):

$$x_n \text{ умножаем на } F_2^{(n)} \text{ и складываем с } F_3^{(n)} \text{ по mod 2 из предыдущей строки, т. е. получаем } F_3^{(n+1)} = (F_3^{(n)} \oplus (x_{n+1} \cdot F_2^{(n)})).$$

В общем виде получается следующий результат:

$$F_i^{(n+1)} = (F_i^{(n)} \oplus (x_{n+1} \cdot F_{i-1}^{(n)})),$$

где  $2 \leq i \leq n - 1$ .

Для полиномов Жегалкина  $F_1^{(n)}$ ,  $F_2^{(n)}$ ,  $F_3^{(n)}$  и  $F_n^{(n)}$  получены минимальные значения показателя сложности  $L_S$  при реализации их соответствующей схемой  $S$  [17—22]. Расширим эту область знаний.

Для  $F_4^{(n)}$ , применяя те же методы (моделирования и структуризации) [19—22], получим минимальную оценку сложности  $L_S(F_4^{(n)})_{\min} = 7n - 25$  при реализации полинома Жегалкина  $F_4^{(n)}$  схемой  $S$  с ветвлением. Для этого выводим вначале основное ФУ типа 1

$$F_4^{(n)} = (F_4^{(n-1)} \oplus (x_n \cdot F_3^{(n-1)})). \quad (6)$$

Затем уравнение (6) преобразуем к виду

$$F_4^{(n)} = (F_4^{(n-1)} \oplus (x_n \cdot (F_3^{(n-2)} \oplus x_{n-1} \cdot (F_2^{(n-3)} \oplus x_{n-2} \cdot F_1^{(n-3)}))))), \quad n \geq 5, \quad (7)$$

для получения минимального значения оценки  $L_S$  при реализации схемой  $S$  с ветвлением. При этом для стандартных итераций метода структуризации получаем подобные структуры (повторяющиеся операции умножения и сложения) при  $n \geq 5$ .

Аналогично предыдущим проведенным выкладкам, реализуя полином Жегалкина  $F_5^{(n)}$  схемой  $S$  с ветвлением, получим оценку сложности  $L_S(F_5^{(n)})_{\min} = 9n - 41$ . Для этого выводим основные ФУ (6) и (7):

$$F_5^{(n)} = (F_5^{(n-1)} \oplus (x_n \cdot F_4^{(n-1)})); \quad (8)$$

$$F_5^{(n)} = (F_5^{(n-1)} \oplus (x_n \cdot (F_4^{(n-2)} \oplus x_{n-1} \cdot (F_3^{(n-3)} \oplus x_{n-2} \cdot (F_2^{(n-4)} \oplus x_{n-3} \cdot (F_1^{(n-4)})))))), \quad (9)$$

где  $n \geq 5$ .

Теперь в табл. 2 для каждого вхождения полинома Жегалкина  $F_i^{(n)}$  вместо него подставляем соответствующую имеющуюся минимальную оценку показателя сложности  $L_S(F_i^{(n)}, G_3)$ , получая табл. 3.



Таблица 3

$n$ — число пере- менных	Сложность по числу ФЭ реализации полиномов Жегалкина $F_i^{(n)}$ , $i = 1, 2, \dots, n$					
	$L_S F_1^{(n)}$	$L_S F_2^{(n)}$	$L_S F_3^{(n)}$	$L_S F_4^{(n)}$	$L_S F_5^{(n)}$	$L_S F_6^{(n)}$
2	1	1				
3	2	4	2			
4	3	7	7	3		
5	4	10	12	10	4	
6	5	13	17	17	13	5
7	6	16	22	24	22	
8	7	19	27	31	31	
...	...	...	...	...	...	...
$n$	$n - 1$	$3n - 5$	$5n - 13$	$7n - 25$	$9n - 41$	...

Табл. 3 заполнена для тех значений параметров  $i$  и  $n$ , для которых выведены оценки показателей сложности  $L_S(F_i^{(n)}, G_3)$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , и при условии, что они помещаются в отведенной ей части табл. 3. При их размещении использована часть таблицы между вертикалью, относящейся к столбцу  $L_S(F_1^{(n)})$  ( $i = 1, n \geq 2$ ), и ниже смещенной (вверх) диагонали, характеризуемой полиномами Жегалкина  $F_n^{(n)}$ ,  $n \geq 2$ . Важной особенностью оценок табл. 3, как ранее было отмечено [17–23], является совпадение оценок, полученных на основе методов последовательной и параллельной декомпозиции.

Табл. 3 может использоваться для получения оценок сложности  $L_S(F_i^{(n)}, G_3)$ , (для соответствующей базы данных). Но что делать, если потребуются оценки из незаполненной части таблицы (нижний правый угол)?

Заметим вначале, что элементы табл. 3 можно считать и записывать по текущему  $n$ , как в таблице, или всегда начинать их нумерацию с первого номера (с единицы). В первом случае  $3n - 5$  есть  $(n - 2)$ -й член последовательности,  $(5n - 13)$  есть  $(n - 3)$ -й член последовательности и так далее. В таком смысле данные табл. 3 упорядочены, приведены к одному стандарту, к одной норме. Представляет интерес следующая задача.

**Основная задача.** При реализации полинома Жегалкина  $F_i^{(n)}$  в классе схем  $S$  из ФЭ (с ветвлением) для заданных  $i$  и  $n$  ( $1 \leq i \leq n, n \geq 2$ ) получить оценку показателя сложности  $L_S(F_i^{(n)}, G_3)$ , которая еще не получена. Найдены оценки конкретных полиномов Жегалкина  $F_1^{(n)}, F_2^{(n)}, F_3^{(n)}, F_4^{(n)}, F_5^{(n)}$  и  $F_n^{(n)}$ .

**Гипотеза.** Считаем, что для каждого из случаев  $1 \leq i \leq n, n \geq 2$ , существуют оценки сложности  $L_S$  реализации симметрических полиномов Жегалкина  $F_i^{(n)}$ , равноудаленные от центра соответствующей строки табл. 3, которые совпадают.

Получать решение этой задачи можно методами моделирования и/или структуризации, как это делалось для полиномов Жегалкина  $L_S(F_4^{(n)})$  и  $L_S(F_5^{(n)})$  уже в данной статье, но это сложно и громоздко, и решение сильно усложняется при возрастании  $n$ . К тому же возникают вопросы: на каких значениях параметров  $i$  и  $n$  надо остановиться? Как хранить в памяти всю табл. 3 даже для небольших значений параметров  $i$  и  $n$ ?

Поэтому для решения можно предложить следующий подход. Для имеющихся оценок в табл. 3 провести исследование и вывести общую универсальную оценку  $L_S(F_i^{(n)}, G_3) = L_S(i, n)$  для  $1 \leq i \leq n, n \geq 2$ .

Для краткости введем обозначения  $u_i = L_S(F_i^{(n)}, G_3)$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Для имеющихся оценок сложности выполним преобразования, разбивая каждую из них на три слагаемых (кроме первой и второй оценок): слагаемое, постоянное относительно  $i$  и линейное по  $n$ , слагаемое, линейное по  $i$ , и последнее слагаемое — в виде многочлена по  $i$  с неопределенными коэффициентами, т. е.

$$u_1 = L_S(F_1^{(n)}, G_3) = L_S(i, n) = (n - 1);$$

$$u_2 = L_S(F_2^{(n)}, G_3) = 3n - 5 = (n - 1) + (2n - 4);$$

$$u_3 = L_S(F_3^{(n)}, G_3) = 5n - 13 = (n - 1) + 2(2n - 4) - 4;$$

$$u_4 = L_S(F_4^{(n)}, G_3) = 7n - 25 = (n - 1) + 3(2n - 4) - 12;$$

$$u_5 = L_S(F_5^{(n)}, G_3) = 9n - 41 = (n - 1) + 4(2n - 4) - 24;$$

$$u_6 = L_S(F_6^{(n)}, G_3) = 11n - 61 = (n - 1) + 5(2n - 4) - 40,$$

...

Коэффициент  $i - 1$  у второго слагаемого определяется несложно. Для получения многочлена по  $i$  рассматриваем сеточную функцию  $u_i$  (4, 12, 24, 40, ... для значений переменной  $i$ ,  $3 \leq i \leq n - 1$ ). Составляем разности первого, второго и далее порядков, пока не получим нулевую строку (если такая существует). Тогда из табл. 4 следует, что разности третьего порядка — нулевые, означающее второй порядок для многочлена  $u_i$ .

Поэтому находим третье слагаемое, удовлетворяющее начальному условию, в виде многочлена второй степени

$$u_i = a_0 i^2 + a_1 i + a_2. \quad (10)$$

Таблица 4

$i$	3	4	5	6	7	...
$u_i$	4	12	24	40	60	...
$\Delta u_i = u_{i+1} - u_i$		8	12	16	20	...
$\Delta^2 u_i = u_{i+1} - \Delta u_i$			4	4	4	...
$\Delta^3 u_i$				0	0	...

Решаем систему линейных уравнений, получаемую из (10) (для  $i = 3, 4, 5$ ) следующим образом, минимизируя вычислительную сложность: из 1-го уравнения вычитаем 2-е, из 2-го вычитаем 3-е, затем выполняется эта же процедура для полученных первых двух уравнений, т. е.

$$a_0 \cdot 5^2 + a_1 \cdot 5 + a_2 = 24;$$

$$a_0 \cdot 4^2 + a_1 \cdot 4 + a_2 = 12;$$

$$a_0 \cdot 3^2 + a_1 \cdot 3 + a_2 = 4$$

и, окончательно, находим  $a_0 = 2$ ;  $a_1 = -6$ ;  $a_2 = 4$ . Итак, решение уравнения есть  $u_i = 2i^2 - 6i + 4$ . Итого, с третьей составляющей искомая оценка сложности показателя равна

$$L_S(F_i^{(n)}, G_3) =$$

$$= (n - 1) + (i - 1)(2n - 4) - (2i^2 - 6i + 4). \quad (11)$$

Итак, искомая оценка сложности  $L_S(F_i^{(n)}, G_3)$  в рамках сформулированной выше гипотезы получена.

Теперь вместо того, чтобы заполнять табл. 3, применяя правила вывода (как это делается в математической логике), используем универсальную оценку (11). Этот подход, бесспорно, будет эффективен при автоматизации и минимизации синтеза и будет требовать меньше вычислительные ресурсы по сравнению с другими. При этом минимизируется объем рабочей памяти.

Гипотезу такого же типа можно выдвинуть относительно оценок сложности  $L_S$  при реализации монотонных симметрических ДНФ.

**Заключение.** Предложенные алгоритмы-программы предназначены для пакета программ управления объектом или технологическим процессом. Загруженные в многопроцессорную (или многоядерную) вычислительно-управляющую систему, они на своем (структурном) уровне могут использоваться для максимального распараллеливания вычислений (обработки информации и выработки управляющих сигналов для входных сигналов  $(\alpha_1, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n)$  (см. рис. 3)).

Этот метод применяется для синтеза программы АЛУ, реализующей систему  $p'$  ( $p' \leq p$ ) полинома Жегалкина или монотонных ДНФ с меньшими значениями числовых характеристик со значениями параметров  $n' \leq n$ ,  $m' \leq m$ ,  $r_i' \leq r_i, \dots$ . Достоинствами такого подхода являются небольшой объем памяти, занимаемый соответствующей программой 1 или 2, и оптимизирующие свойства этих программ.

#### Список литературы

1. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Филимонов А. Б., Петрин К. В. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть 1. Основы агентного подхода // Мехатроника, автоматизация, управление. № 7. 2010. С. 11–21.
2. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Филимонов А. Б., Петрин К. В. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть II. Агентные решения

в задачах контроля и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. № 10. 2010. С. 11–21.

3. Федотов В. Б. Технология многоагентных систем и доступ к распределенным информационным ресурсам // VII Междунар. конф. по электронным публикациям "EL-Pub2002". 23–27 сент. 2002 г. г. Новосибирск, Академгородок, номер гос. регистрации 0320300063.

4. Тимофеев А. В. Архитектура и принципы построения мультиагентных телекоммуникационных систем нового поколения // XI Всеросс. науч.-метод. конф. "Телематика—2004".

5. Городецкий В. И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 1. С. 44–59.

6. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.

7. Каляев И. А., Гандурин В. А., Мельник Э. В. Принципы создания интеллектуальных многопроцессорных вычислительных систем на основе мультиагентного взаимодействия // Первая Междунар. науч.-техн. мультиконф. "Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники — ИКТМ-2007. Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы, МВУС-2007". 24–29 сентября 2007. Т. 1. С. 157–164.

8. Блушвили И. В., Радченко С. А., Каляев А. И. Программная модель мультиагентной конфигурации // Первая Междунар. науч.-техн. мультиконф. "Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники — ИКТМ-2007. Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы, МВУС-2007". 24–29 сентября 2007. Т. 1. С. 315–317.

9. Плоткин Б. И. Универсальная алгебра, алгебраическая логика и базы данных. М.: Физматлит, 1991. 446 с.

10. Храпченко В. М. О соотношении между сложностью и глубиной формул // Методы дискретного анализа в синтезе управляющих систем. Новосибирск, 1978. Вып. 32. С. 76–94.

11. Ложкин С. А. О связи между глубиной и сложностью эквивалентных формул и о глубине монотонных функций алгебры логики // Проблемы кибернетики. М.: Наука, 1981. Вып. 38. С. 269–271.

12. Редькин Н. П. Доказательство минимальности некоторых схем из функциональных элементов // Проблемы кибернетики. 1970. Вып. 23.

13. Кузнецов О. П., Адельсон-Вельский Г. М. Дискретная математика для инженера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 480 с.

14. Чебурахин И. Ф. Автоматизация синтеза комбинационных автоматов в базе микросхем на основе функциональных уравнений // Тр. Института системного анализа РАН. Динамика неоднородных систем. Т. 31 (1). 2007. С. 328–333.

15. Чебурахин И. Ф. Оптимизация программ управления для логических контроллеров // Вычислительная техника. Системы. Управление. Москва — София. МЦНИТИ, 1989. Вып. 1. С. 56–64.

16. Чебурахин И. Ф. Автоматизированная разработка оптимальных программ управления для логических контроллеров // Автоматизация проектирования систем программно-логического управления. М.: Машиностроение, 1990. Вып. 2. С. 151–196.

17. Чебурахин И. Ф. Синтез дискретных управляющих систем и математическое моделирование: алгоритмы, программы. М.: Физматлит, 2004.

18. Чебурахин И. Ф. Задачи автоматизации и оптимизации аппаратной и программной реализации булевых функций // Информационные технологии. 1999. № 2. С. 28–34.

19. Чебурахин И. Ф. Методы декомпозиции булевых функций: алгоритмы, показатели качества, приложения // Изв. РАН. ТиСУ. № 5. 2003. С. 56–61.

20. Чебурахин И. Ф. Сложность булевых функций для интеллектуальных систем синтеза цифровых ИС // Изв. РАН. ТиСУ. № 3. 2006. С. 150–165.

21. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Логическое управление и обработка информации в мехатронных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. № 5. 2010. С. 33–37.

22. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Специальная реляционная база данных для оптимизации и автоматизации синтеза комбинационных автоматов // Мехатроника, автоматизация, управление. № 9. 2010. С. 7–13.

23. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Модели для оптимизации и автоматизации синтеза дискретных устройств обработки информации в мехатронных системах // 3-я Росс. мультиконф. по проблемам управления. Матер. 7-й науч.-техн. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление МАУ-2010". 12–14 октября 2010. С. 420–423.

**В. Ю. Осипов**, д-р техн. наук, проф.,  
Санкт-Петербургский институт  
информатики и автоматизации РАН  
osipov\_vasily@mail.ru

## Оптимизация ассоциативных интеллектуальных систем

*Предложен подход к оптимизации ассоциативных интеллектуальных систем (АИС). Введен показатель их ассоциативной эффективности. По этому показателю исследованы преимущества ряда логических структур, входящих в АИС двухслойных рекуррентных нейронных сетей с управляемыми синапсами. Приведены результаты математического моделирования. Даны практические рекомендации по использованию предложенного подхода и повышению эффективности АИС.*

**Ключевые слова:** ассоциативная интеллектуальная система, нейронная сеть, структура, оптимизация

**Введение.** Решение проблемы создания ассоциативных интеллектуальных систем (АИС) с широкими функциональными возможностями предусматривает поиск их оптимальных структур.

В рамках предложенного в [1–3] перспективного подхода к построению АИС на основе двухслойной рекуррентной нейронной сети (РНС) с управляемыми синапсами возможно формирование вариантов структур таких систем. Их формирование осуществимо за счет специальных пространственных сдвигов совокупностей единичных образов вдоль слоев РНС. Многообразие получаемых за счет таких сдвигов структур АИС велико, а их возможности различны.

Для поиска оптимальных структур АИС, предназначенных для решения широкого ряда творческих задач, нужны соответствующие методы.

Анализ известных методов [4–9] показывает, что они не учитывают специфику АИС. В основном эти методы сводятся к решению оптимизационных задач обучения нейронных сетей, их настройке, а не к расширению ассоциативных возможностей АИС в целом. Это существенно ограничивает их применимость для поиска оптимальных структур АИС широкой направленности.

Рассматривается новый метод оптимизации структуры АИС, лишенный отмеченных недостатков.

**Постановка задачи.** Планируется создание прикладной АИС. Это может быть АИС синхронного перевода речи с одного языка на другой, помощи врачам, инженерам, пилотам, спасателям. Известна обобщенная структура такой системы, состоящей из датчиков информации, управляющих устройств и искусственного "мозга" в виде двухслойной РНС с управляемыми синапсами [1–3]. Определены требования к таким датчикам и управляющим устройствам. Среди них — виды воспринимаемых, обрабатываемых и формируемых на выходе сигналов,

условия их разложения и восстановления из единичных образов. Заданы условия, на каких интервалах времени и в какой очередности должны связываться входные сигналы в АИС. В РНС АИС допускаются связи нейронов через соответствующие синапсы только с нейронами взаимодействующих слоев. Связи между нейронами одного и того же слоя исключены. Все допустимые связи характеризуются не только весовыми коэффициентами синапсов, несущими информацию о запомненных сигналах, но и функциями ослабления, которыми можно управлять в интересах формирования необходимых структур РНС и самой АИС.

За счет управления функциями ослабления синапсов осуществимы пространственные сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев нейронной сети и разбиение их на различные логические поля со своими связями. Предварительно разложенные на составляющие и преобразованные в совокупности единичных образов входные сигналы в общем случае могут подаваться и сниматься после обработки с различных логических полей первого и второго слоев нейронной сети. В зависимости от того, какая структура двухслойной РНС с управляемыми синапсами будет использоваться, как будут связаны входные сигналы и их элементы друг с другом и выходными воздействиями, зависят потенциальные возможности АИС.

Необходимо разработать метод оптимизации структуры АИС, учитывающий эти обстоятельства.

**Пространство ассоциаций сигналов.** Для решения поставленной задачи определимся с видами и пространством возможных ассоциаций сигналов в АИС.

Все ассоциации сигналов в АИС можно подразделить на связывание элементов одной и нескольких текущих совокупностей единичных образов одного или группы сигналов. Ассоциации могут быть прямыми и опосредованными. Для первых характерно одновременное связывание различных элементов одной или группы совокупностей единичных образов.

Максимальное значение положительного или отрицательного связывания единичных образов друг с другом зависит только от того, каким ослаблением характеризуется конкретная связь между нейронами.

Каждая из связей (синапсов) имеет свое значение функции ослабления  $\beta_{ij}(r_{ij})$  единичных образов, зависящее от  $r_{ij}$  — удаленности связываемых через синапсы нейронов (расстояний между ними на плоскости  $X, Y$ ). Полагается, что расстояние между взаимодействующими слоями нейронной сети АИС стремится к нулю.

Для обеспечения приоритетности коротких связей в РНС функция  $\beta(r_{ij})$  может определяться как [1]

$$\beta(r_{ij}) = \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_{ij}}}; \quad i = \overline{1, N}; j = \overline{1, N}; \quad (1)$$

где  $h$  — степень корня (чем она выше, тем шире ассоциативное пространственное взаимодействие в сети);  $\alpha$  — положительный постоянный коэффициент;  $N$  — число нейронов в каждом слое РНС.

Входящую в (1) величину  $r_{ij}$  в единицах нейронов с учетом возможных пространственных сдвигов совокупностей единичных образов вдоль слоев РНС можно выразить в виде

$$r_{ij} = \sqrt{(\Delta x_{ij} + n_{ij}d)^2 + (\Delta y_{ij} + m_{ij}q)^2};$$

$$n_{ij} = \pm 0, 1, \dots, L - 1; m_{ij} = \pm 0, 1, \dots, M - 1; \quad (2)$$

$\Delta x_{ij}$ ,  $\Delta y_{ij}$  — проекции связи  $j$ -го нейрона с  $i$ -м на оси  $X$ ,  $Y$  без учета пространственных сдвигов;  $d$ ,  $q$  — единичные сдвиги, соответственно, по координатам  $X$ ,  $Y$ ;  $L$ ,  $M$  — число, соответственно, столбцов и строк, на которые разбивается каждый слой нейронной сети за счет сдвигов.

Произведение  $d \times q$  определяет площадь минимального рабочего поля (ячейки) каждого слоя сети. Численно она равна числу нейронов, входящих в поле и не может быть меньше числа составляющих, на которые разбивается один или несколько сгруппированных сигналов. Чем больше полей с размером  $d \times q$  в каждом слое и шире связи между ними, тем выше возможности сети как по пространственному, так и временному ассоциативному связыванию сигналов.

Именно множество различных допустимых сдвигов совокупностей единичных образов вдоль слоев сети, а также вид функции ослабления и значения  $L$ ,  $M$  определяют пространство ассоциаций сигналов в АИС. Так, путем одновременного уменьшения  $\Delta x_{ij}$  для всех синапсов второго слоя на величину  $d$  реализуется сдвиг текущей совокупности единичных образов вдоль этого слоя по координате  $X$  вправо. За счет цикличности обмена информацией первого слоя со вторым все пространство слоев (рис. 1) разбивается на  $L$  полей. На рис. 1, а показана структура ассоциативного обмена информа-

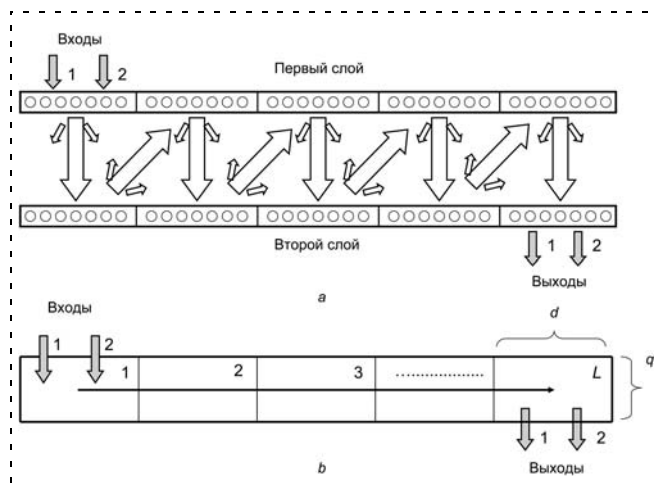


Рис. 1. Структура двухслойной рекуррентной сети в виде бегущей строки

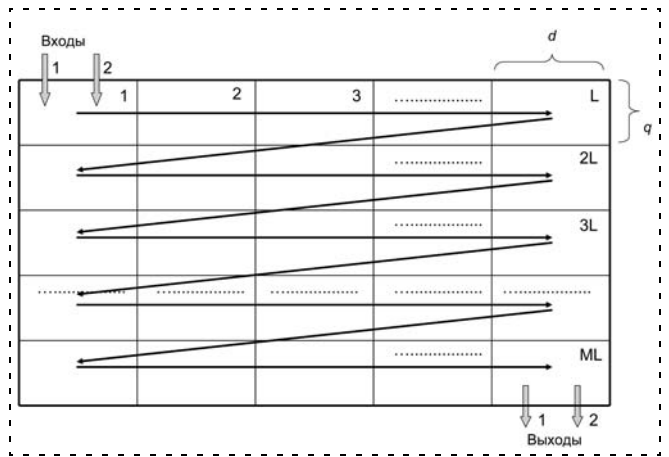


Рис. 2. Структура сети в виде спирали

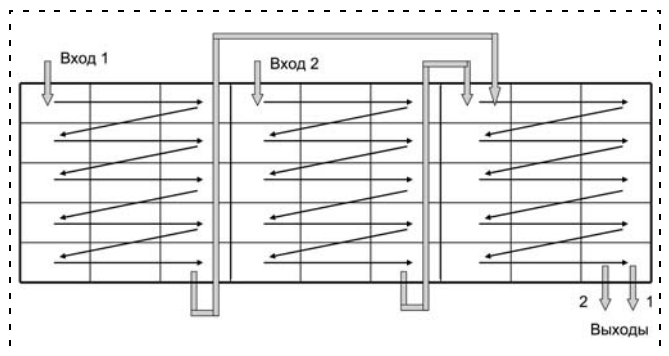


Рис. 3. Двухуровневая спиральная структура сети

цией между слоями нейронной сети для этого случая. В соответствии с рис. 1, а входные сигналы в виде последовательных совокупностей единичных образов подаются на первое поле первого слоя, продвигаются по сети в указанных направлениях, ассоциируются друг с другом. При этом входные последовательные совокупности единичных образов преобразуются в параллельные, а снимаются с РНС после ассоциаций снова как последовательные. Имеет место логическая структура в виде бегущей строки. Эту структуру также можно отобразить в виде, показанном на рис. 1, б (вид сверху на первый слой), где длинной стрелкой обозначено направление продвижения обрабатываемых сигналов вдоль слоя.

Примеры возможных структур РНС АИС с пространственными сдвигами по обоим координатам приведены на рис. 2, 3. Согласно рис. 2 двухслойную РНС с управляемыми синапсами за счет рассматриваемых сдвигов можно заставить функционировать как спиральную структуру. В ней сигналы продвигаются в плоскостях слоев РНС по спирали. Для еще большего расширения ассоциативного взаимодействия сигналов эта структура за счет обратных связей может быть дополнена вторым и последующими слоями спирали.

В случае необходимости предварительного распознавания отдельных сигналов, а затем ассоциирования их друг с другом на двухслойной рекуррентной сети с управляемыми синапсами можно сформировать структуру, приведенную на рис. 3.

Такая структура состоит из трех взаимосвязанных подсетей. Она может использоваться, например, при создании робота с бинокулярным зрением или бинауральным слухом.

Из анализа пространства ассоциаций сигналов в АИС следует, что лежащая в ее основе двухслойная РНС с управляемыми синапсами предоставляет широкие возможности по формированию различных ее логических структур. Это могут быть одноуровневые и многоуровневые логические структуры со своими ассоциативными возможностями.

**Метод оптимизации.** Принимая во внимание особенности постановки задачи и пространства возможных ассоциаций сигналов в АИС, поиск оптимальной структуры этой системы может быть сведен к оптимизации ее РНС и разбит на два этапа:

- 1) определение размеров минимальных рабочих полей, подсетей и слоев РНС АИС;
- 2) оптимизация структур подсетей и РНС АИС в целом.

Определение размеров минимальных рабочих полей, подсетей и слоев сети осуществимо на основе данных о видах воспринимаемых, обрабатываемых и формируемых на выходе АИС сигналов, об условиях их разложения и восстановления из единичных образов, интервалах времени, на которых должны связываться сигналы. В интересах этого необходимо сформировать группы из сигналов, которые должны быть связаны на одном и том же интервале времени  $T_k$ . Для каждой  $k$ -й группы следует определить суммарное число  $B_k$  составляющих, на которые

разложены эти сигналы,  $B_k = \sum_{e=1}^{E_k} Q_{ek}$ , где  $Q_{ek}$  —

число составляющих  $e$ -го сигнала в  $k$ -й группе. Затем необходимо умножить полученные результаты на соответствующие интервалы времени связи и поделить на время одного цикла  $t_{ц}$  обмена информацией в РНС. В итоге получим число  $N_k$  нейронов в подсетях РНС, характерных для выделенных групп:  $N_k = B_k T_k / t_{ц}$ . Их сумма равна числу  $N$  нейронов в каждом слое РНС:  $N = \sum_{k=1}^K N_k$ . Правила

объединения подсетей друг с другом определяются условиями взаимного предшествования интервалов времени взаимосвязи сигналов. Значения  $d_k$  и  $q_k$  единичных сдвигов, соответственно, по координатам  $X, Y$  для каждой подсети РНС могут быть рас-

считаны как  $d_k = q_k = \sqrt{B_k}$ . В частном случае при наличии только одной группы сигналов РНС не разбивается на подсети:  $d = d_k = 1, q = q_k = 1$ .

В интересах определения оптимальной структуры каждой подсети и РНС в целом предлагается ввести показатель  $F_{ij}$  пространственно-временной связи между единичными образами в РНС. Он может быть определен через произведение функции  $\beta_{ij}(r_{ij})$  ослабления и времени  $t_{ij}$  преодоления единичным образом расстояния  $r_{ij}$  в плоскости первого или второго слоя РНС:  $F_{ij} = \beta_{ij}(r_{ij})t_{ij}$ . Время  $t_{ij}$  равно сумме отдельных тактов работы сети, за которые единичный образ от  $i$ -го нейрона дойдет до  $j$ -го нейрона в плоскости одного и того же слоя РНС. Это время в зависимости от логической структуры сети при одном и том же расстоянии  $r_{ij}$  может существенно отличаться. Например, кратчайшие расстояния между нейронами первого и  $(L + 1)$ -го полей слоев сети на рис. 2 незначительны, однако время преодоления их единичными образами велико. Единичные образы продвигаются вдоль сети не по кратчайшим путям, а в соответствии с указанным направлением.

Замечая, что функция  $\beta_{ij}(r_{ij})$  безразмерна и принимает значения только от нуля до единицы, с физической точки зрения введенный показатель можно трактовать также как время активного взаимодействия между единичными образами в плоскостях РНС АИС. Чем меньше ослабление и чем на большем интервале времени осуществляется взаимодействие единичных образов, тем шире ассоциативные возможности АИС.

С учетом этого поиск оптимальной логической структуры  $S_0$  как отдельных подсетей, так и РНС АИС в целом предлагается осуществлять исходя из достижения  $F(S_0)$  максимума среднего времени активного взаимодействия между единичными образами в плоскостях слоев сети:

$$\bar{F}(S_0) = \max_{z \in \Omega} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \beta_{ij}(r_{ij}(S_z)) t_{ij}(S_z) \quad (3)$$

при условиях:

$$\beta(r_{ij}(S_z)) = \frac{1}{1 + \alpha h \sqrt{r_{ij}(S_z)}}; \quad (4)$$

$$r_{ij}(S_z) = \sqrt{(\Delta x_{ij} + n_{ij}(S_z)d)^2 + (\Delta y_{ij} + m_{ij}(S_z)q)^2} \in R; \quad (5)$$

$$n_{ij}(S_z) = \pm 0, 1, \dots, L - 1; m_{ij}(S_z) = \pm 0, 1, \dots, M - 1; \\ i = \overline{1, N}; j = \overline{1, N}.$$

В (3)–(5) приняты следующие обозначения:  $\Omega$  — множество допустимых логических структур РНС;  $S_z$  — альтернативный  $z$ -й вариант логической структуры РНС;  $L, M$  — число, соответственно, столбцов и строк, на которые разбивается каждый слой нейронной сети за счет реализуемых пространственных сдвигов совокупностей единичных образов;  $R$  — множество допустимых значений  $r_{ij}(S_z)$  в пространстве слоев РНС. Другие обозначения пояснены при описании формул (1), (2).

Название структуры	Число нейронов в каждом слое, $N$								
	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
"Бегущая строка"	$\frac{60 \times 6}{10 \times 1}$	$\frac{90 \times 6}{15 \times 1}$	$\frac{120 \times 6}{20 \times 1}$	$\frac{150 \times 6}{25 \times 1}$	$\frac{180 \times 6}{30 \times 1}$	$\frac{210 \times 6}{35 \times 1}$	$\frac{240 \times 6}{40 \times 1}$	$\frac{270 \times 6}{45 \times 1}$	$\frac{300 \times 6}{50 \times 1}$
"Спираль 12"	$\frac{12 \times 30}{2 \times 5}$	—	$\frac{12 \times 60}{2 \times 10}$	—	$\frac{12 \times 90}{2 \times 15}$	—	$\frac{12 \times 120}{2 \times 20}$	—	$\frac{12 \times 150}{2 \times 25}$
"Спираль 30"	$\frac{30 \times 12}{5 \times 2}$	$\frac{30 \times 18}{5 \times 3}$	$\frac{30 \times 24}{5 \times 4}$	$\frac{30 \times 30}{5 \times 5}$	$\frac{30 \times 36}{5 \times 6}$	$\frac{30 \times 42}{5 \times 7}$	$\frac{30 \times 48}{5 \times 8}$	$\frac{30 \times 54}{5 \times 9}$	$\frac{30 \times 60}{5 \times 10}$
"Спираль 60"	$\frac{60 \times 6}{10 \times 1}$	—	$\frac{60 \times 12}{10 \times 2}$	—	$\frac{60 \times 18}{10 \times 3}$	—	$\frac{60 \times 24}{10 \times 4}$	—	$\frac{60 \times 30}{10 \times 5}$
"Спираль 120"	—	—	$\frac{120 \times 6}{20 \times 1}$	—	—	—	$\frac{120 \times 12}{20 \times 2}$	—	—

Решение этой задачи в общем случае предусматривает генерирование альтернативных структур и оценку их эффективности с выбором наилучшего варианта. Для оптимизации решения задачи применим метод ветвей и границ. Генерирование альтернативных логических структур РНС возможно путем варьирования параметрами  $n_{ij}(S_z)$  и  $m_{ij}(S_z)$ ,  $L$  и  $M$  с отсечением заранее не перспективных вариантов. При этом должно учитываться требование непрерывности продвижения совокупностей единичных образов по сети. В самом простом случае поиск целесообразного варианта может быть сведен к выбору структуры РНС АИС с наибольшим показателем  $F(S_0)$  из заданного набора структур.

**Пример.** В соответствии с рассмотренным методом оптимизации логической структуры РНС и самой АИС осуществляли поиск ее целесообразного варианта, обеспечивающего наилучшие ассоциативные возможности системы. Исследовали три типа структуры. Первая — в виде бегущей строки, две другие — спирали с диаметрами ( $D$ ) 12, 30, 60, 120 нейронов. Типы этих структур будем называть ниже "Бегущая строка", "Спираль 12", "Спираль 30", "Спираль 60", "Спираль 120". Все размеры исследуемых структур сетей приведены в таблице. В числителях дробей таблицы дано произведение длины слоя на его ширину в единицах нейронов, а в знаменателях — произведение длины строки (диаметра спирали) в единицах столбцов размером  $d = 6$  на число строк (витков) шириной  $q = 6$ .

В интересах оценки принятого показателя эффективности (3) этих структур с учетом условий (4), (5) использовали программную модель двухслойной РНС с управляемыми синапсами. Полученные зависимости  $F(N)$  — среднего времени активного взаимодействия между единичными образами в плоскостях слоев сетей с исследуемыми структурами от числа  $N$  нейронов в каждом слое — приведены на рис. 4, 5. Время на этих рисунках приведено в условных единицах.

Из анализа рис. 4 видно, что наилучшими ассоциативными возможностями обладает РНС со спиральной структурой. Для функции (4) с  $h = 4$ ,  $\alpha = 40$  структура "Спираль 30" с диаметром спирали  $D = 30$  нейронов при десяти витках, каждый шириной по 6 нейронов, с  $N = 1800$  и  $d = q = 6$  обеспечивает выигрыш по сравнению с "Бегущей строкой" длиной 300 и шириной 6 нейронов на 29 %.

Исследовали три типа структуры. Первая — в виде бегущей строки, две другие — спирали с диаметрами ( $D$ ) 12, 30, 60, 120 нейронов. Типы этих структур будем называть ниже "Бегущая строка", "Спираль 12", "Спираль 30", "Спираль 60", "Спираль 120". Все размеры исследуемых структур сетей приведены в таблице. В числителях дробей таблицы дано произведение длины слоя на его ширину в единицах нейронов, а в знаменателях — произведение длины строки (диаметра спирали) в единицах столбцов размером  $d = 6$  на число строк (витков) шириной  $q = 6$ .

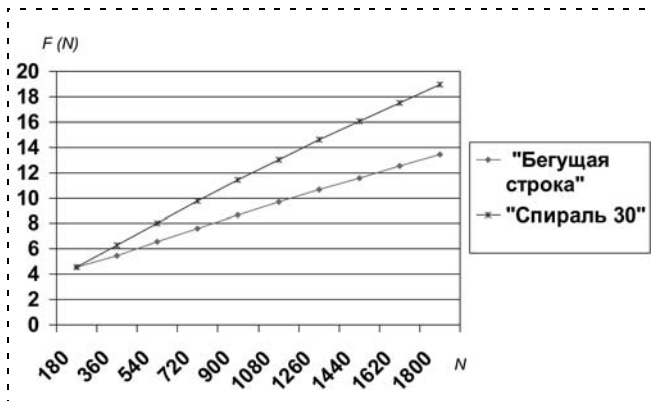


Рис. 4. Результаты оценки эффективности РНС со структурами "Бегущая строка" и "Спираль 30"

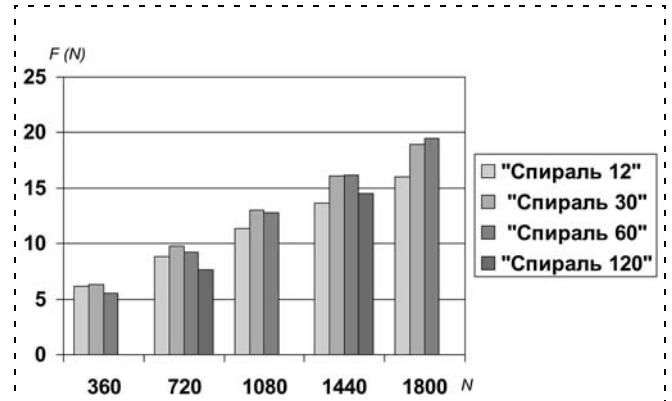


Рис. 5. Эффективность РНС со спиральными структурами

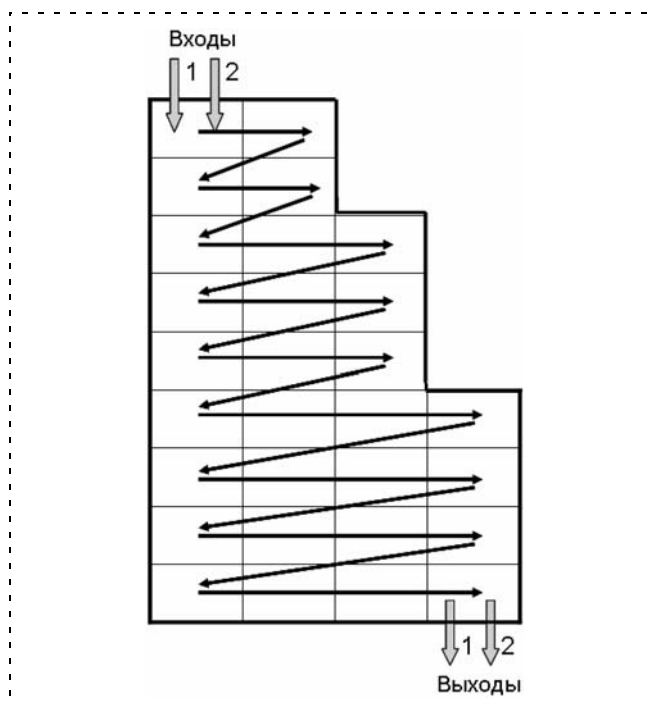


Рис. 6. Структура РНС с изменяющимся диаметром спирали

Сравнение спиральных структур с диаметрами 12, 30, 60, 120 с шириной витков по 6 нейронов при  $d \times q = 36$  позволило установить следующую особенность. С ростом размеров сети спиральные структуры с меньшим  $D$  начинают уступать по эффективности структурам, у которых диаметр больше. На рис. 5 видно, что спиральная структура с  $D = 30$  имеет преимущество над структурой с  $D = 60$  только для слоев сети с  $N$ , меньшим 1440 нейронов. Затем она проигрывает позиции. Структура с  $D = 12$  при  $N = 144$  лучше всех. Однако для РНС с  $N = 360$  ее эффективность уже ниже, чем у структуры с  $D = 30$ .

Если учесть, что поступающие в РНС сигналы заполняют ее и покидают постепенно, для более эффективной их обработки целесообразно использовать сети со спиральной структурой с расширяющимся диаметром витков. Например, РНС может иметь продольную логическую структуру, приведенную на рис. 6. В этой структуре РНС диаметр спирали имеет три различных значения. Стрелками показано направление продвижения сигналов вдоль слоев РНС.

В РНС с подобными структурами время активного взаимодействия между единичными образами в плоскостях слоев сети выше, чем в других.

Преимущество спиральных структур РНС над линейными были подтверждены также результатами обработки на таких сетях одних и тех же динамических сигналов.

Таким образом, к наиболее эффективным АИС на основе двухслойных РНС с управляемыми синапсами можно отнести системы с логическими спиральными структурами их нейронных сетей.

### Выводы

1. Предложен новый метод поиска оптимальных структур АИС. В качестве основного показателя ассоциативной эффективности этих систем рекомендуется использовать среднее время активного взаимодействия единичных образов (элементов сигналов) в плоскостях слоев сети. Метод рекомендуется применять при обосновании и разработке АИС прикладного назначения.

2. Установлено, что спиральные структуры РНС с управляемыми синапсами эффективнее линейных.

3. Эффективность РНС АИС со спиральными структурами зависит от диаметра спиралей.

4. В составе перспективных АИС рекомендуется использовать РНС со спиральными структурами с возрастающим диаметром спиралей.

### Список литературы

1. Осипов В. Ю. Ассоциативная интеллектуальная машина // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 2.
2. Осипов В. Ю. Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 7. С. 27–32.
3. Осипов В. Ю. Рекуррентная нейронная сеть с управляемыми синапсами // Информационные технологии. № 7. 2010. С. 43–47.
4. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей. Кн. 1: Учебное пособие для вузов // Под общей ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2000. 416 с.
5. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с английского И. Д. Рудницкого. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1103 с.
7. Субботин С. А. Методы синтеза нейросетевых и нейронечетких распознающих моделей с линеаризацией и факторной группировкой признаков // Искусственный интеллект. 2008. № 1.
8. Pentti O. A. Haikonen. The Role of Associative Processing in Cognitive Computing // Cognitive Computation. 2009. V. 1.
9. Хокинс Дж., Блейсли Сандра. Об интеллекте. М.: Издательский дом "Вильямс", 2007. 240 с.

**В. И. Городецкий,**  
д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,  
**О. Л. Бухвалов,** аспирант,  
Санкт-Петербургский институт  
информатики и автоматизации РАН  
gor@iias.spb.su  
oleg\_b@iias.spb.su

## Управление нагрузкой ГРИД на основе многоагентной модели самоорганизации

### Часть 1. Многоагентная модель и механизм самоорганизации

*Предлагается модель и описывается разработанный программный прототип распределенного управления ресурсами ГРИД с динамической топологией на основе многоагентной модели самоорганизации, в которой реализуется управление, использующее только локальные взаимодействия агентов. Описывается механизм самоорганизации, предлагается архитектура, в основе которой используется распределенная P2P FIPA-совместимая агентская платформа, средства эмуляции распределенной P2P-коммуникационной среды и другие инструментальные средства, разработанные в лаборатории интеллектуальных систем СПИИРАН.*

***Ключевые слова:** самоорганизация, мультиагентные системы, ГРИД, управление ресурсами, P2P-агентская платформа*

#### Введение

Современные открытые системы могут включать в себя огромное число компьютеров, причем эти компьютеры могут динамически появляться в сети и уходить из нее, а система в целом может динамически менять свою топологию. В таких системах оказывается практически невозможным оперативно отслеживать состояния ее компонентов и ресурсов (компьютеров, памяти, сервисов, программ обработки, интерфейсов доступа и т. д.). Сложность возникающих при этом проблем управления, в частности управления разнородными ресурсами, намного превосходит возможности существующих стандартных методов и средств централизованного управления и оптимизации. Это влечет необходимость пересмотра ряда современных взглядов, методов, моделей и средств проектирования открытых систем, а также средств их программной реализации. Именно эти причины оказались главными катализаторами современного интереса к самоорганизующимся системам, реализуемым в классе многоагентных систем и технологий.

Теория и практика многоагентных самоорганизующихся систем находятся в настоящее время в стадии интенсивного развития [1, 2, 3, 4, 5, 6 и др.]. Большой интерес к практическому использованию идей и методов многоагентной самоорганизации проявляется исследователями и разработчиками

приложений в самых различных областях. К ним относятся, например, адаптивное планирование и оперативное управление логистикой производства [7, 8], транспортная логистика, планирование и составление расписаний в различных постановках, управление дорожным движением [9] и многие другие [4–6]. Однако наиболее интересные и практически важные модели и программные приложения, которые уже к настоящему времени получили практическое применение, разработаны в области программных инфраструктур компьютерных сетей ([1, 10–12] и др.), поддерживающих функционирование крупномасштабных открытых систем, в том числе, мобильных сетей и систем.

В данной статье рассматривается одно из таких приложений, а именно, динамическое управление ресурсами сети компьютеров (ГРИД) с использованием многоагентной самоорганизующейся архитектуры в условиях динамического потока заявок на использование ее ресурсов. Поскольку ресурсы ГРИД в настоящее время стали товаром, за который пользователи готовы платить, то владельцы ГРИД заинтересованы о том, чтобы компьютеры сети хорошо использовались, чтобы ее ресурсы и сервисы были доступны пользователям без задержек. Именно это определяет текущую актуальность проблемы оптимизации использования ресурсов ГРИД для наилучшего удовлетворения поступающих заявок.

В данной статье рассматривается самоорганизующаяся многоагентная модель балансировки нагрузки на компьютеры ГРИД. Вычислительный ресурс компьютеров сети является только одним из многочисленных ресурсов, которыми необходимо оперативно управлять, хотя, возможно, и самый главным. С этой точки зрения рассматриваемая в статье постановка задачи является упрощенной. Однако основной целью данной работы является не столько решение заявленной оптимизационной задачи, сколько проверка возможностей, преимуществ и недостатков многоагентной архитектуры и особенностей программной реализации крупномасштабной самоорганизующейся системы. По этой причине адекватность постановки задачи, использование адекватной модели распределения ресурсов ГРИД и другие практически важные аспекты задачи оперативного управления разнородными ГРИД-ресурсами не являются в данной работе определяющими.

Прототипом модели управления ресурсами ГРИД, рассматриваемой в данной статье, является весьма простая модель, описанная в работе [5]. Однако модель, исследуемая в данной статье, существенно обобщает ее как в части постановки задачи (раздел 1), так и в части используемых методов самоорганизации. В статье представлены различные аспекты многоагентной архитектуры самоорганизующейся системы управления ресурсами ГРИД, построенной на основе парных (peer-to-peer, P2P) взаимодействий (раздел 2). Описаны особенности программной реализации этой системы (раздел 3),



приведены основные результаты экспериментальных исследований различных свойств процесса функционирования (раздел 4), а также дана оценка основных результатов работы и перспектив их использования и дальнейшего развития (заключение).

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим компьютерную сеть, каждый узел которой соответствует отдельному вычислительному ресурсу (компьютеру) распределенной ГРИД-сети. Предполагается, что рассматриваемая сеть не имеет централизованного управления распределением потока заявок на решение задач, а заявки могут поступать на любой узел непосредственно. Модель внешней среды, которая является источником заявок на решение задач, предполагает, что потоки заявок, поступающих в узлы ГРИД, задаются для каждого узла в отдельности и имеют пуассоновское распределение. Полагается, что задачи имеют различную трудоемкость, однако эти характеристики системе неизвестны. Предполагается также, что компьютеры обладают различной производительностью. Кроме того, для каждого узла задается случайная модель его "присутствия" в сети, которая генерирует моменты времени, когда компьютер появляется в сети и уходит из нее. Предполагается, что сеть имеет *ad-hoc* архитектуру, т. е. каждый ее узел "знает" о существовании только своих соседей, а о топологии сети в целом, как и о других ее узлах, ему ничего неизвестно. Предполагается также, что каждый узел может взаимодействовать напрямую только со своими соседями, т. е. рассматриваемая сеть является P2P-сетью. Несмотря на то, что соседи любого узла могут время от времени отсутствовать в сети, каждый узел всегда знает, какие именно его соседи "живы" в сети в текущий момент. Это информация получается им с помощью обмена сообщениями по простому протоколу. Другие источники динамики топологии сети, например, мобильность узлов, в рассмотренной модели пока не моделировали, поскольку все новые проблемы, которые при этом было бы необходимо решать, в основном, аналогичны проблемам, возникающим при динамике присутствия узлов в сети.

Для простоты положим, что для каждого узла задана лишь его относительная производительность, измеряемая коэффициентом пропорциональности по отношению к некоторому эталонному компьютеру (узлу сети). Аналогично задаются трудоемкости задач: для каждой задачи задается оценка времени ее решения на эталонном вычислительном узле. Однако подчеркнем, что узел сети не знает о трудоемкости задачи. Эта величина нужна только для системы симуляции, которая вычисляет время окончания решения задачи на конкретном компьютере, когда он может взять из очереди на исполнение следующую задачу. Кроме того, каждая поступающая задача характеризуется временем ее прибытия из внешней среды.

Предположим далее, что в любой момент времени каждый узел сети может быть занят решением не более чем одной задачи, а в его буфер может быть загружено некоторое число задач, ожидающих очереди на решение. Поскольку различные задачи могут требовать различных ресурсов, а компьютеры могут обладать различной производительностью, то, если не управлять распределением задач по узлам сети, то одни компьютеры могут иметь значительную очередь, в то время как другие могут в это время простаивать.

Предполагается, что для выравнивания нагрузки на компьютеры сети и, тем самым, для повышения производительности сети в целом узлы сети могут пересылать задачи из своей очереди своим соседям. Задача, пришедшая на некоторый компьютер, за несколько таких сеансов пересылки может оказаться в очереди или в процессе исполнения на любом другом достижимом компьютере ГРИД. Таким образом, исполнительным механизмом выравнивания нагрузки на узлы сети является обмен задачами между ее компьютерами, а управляющим механизмом является стратегия обмена задачами между соседями сети. Содержательно задача в целом состоит в том, чтобы с помощью механизма самоорганизации обеспечить, с одной стороны, более или менее равномерную нагрузку на узлы сети, а с другой стороны, обеспечить "сравнимое" время ожидания в очереди для всех задач.

Ставились следующие конкретные цели:

1. Разработать *многоагентную архитектуру* самоорганизующейся системы выравнивания нагрузки на компьютеры сети, конкретный механизм самоорганизации, а также архитектуру P2P-инфраструктуры, поддерживающей взаимодействие агентов при распределенном управлении нагрузкой в стиле, ориентированном на сервис.

2. Разработать *программный прототип* распределенной многоагентной P2P-системы управления нагрузкой ГРИД-сети, включая эмулятор P2P-коммуникационной среды, который позволил бы фиксировать и оценивать дополнительную нагрузку на коммуникационный компонент системы.

3. Провести экспериментальные исследования процесса функционирования разработанной модели на основе программного прототипа и оценить качественно ее работоспособность, а также перспективность ее обобщения на другие практические задачи управления гетерогенными ресурсами ГРИД в режиме реального времени.

## 2. Многоагентная архитектура и механизм самоорганизации

Поставим в соответствие каждому узлу сети *агента*, который "знает" текущую длину очереди задач в своем компьютере и может обмениваться сообщениями со своими соседями, т. е. с агентами тех узлов сети, с которыми он имеет непосредственную связь.

Предполагается, что ни один агент не знает, какова длина очереди задач в буфере того или иного соседа, не знает топологию сети в целом, не обладает информацией о скорости работы компьютеров своих соседей и не знает общего числа узлов сети в текущий момент.

Поскольку качество сервиса, предоставляемого ГРИД своим клиентам, определяется временем пребывания задачи клиента с ГРИД, то задача механизма самоорганизации состоит в том, чтобы минимизировать это время "в среднем". С точки зрения владельцев ГРИД требуется, чтобы компьютеры не простаивали, т. е. необходимо обеспечить более или менее равномерную нагрузку на узлы сети. Это определяет механизм самоорганизации, принятый в работе.

Механизм самоорганизации для выравнивания очередей, используемый в рассматриваемой задаче (он заимствован из работы [5]), основан на обмене задачами между агентами. Обмен задачами устроен так, что каждый агент пересылает своим соседям за один шаг определенное число задач. Это число выбирается так, чтобы оно, во-первых, было пропорционально длине очереди задач в его буфере, и, во-вторых, оно должно быть пропорционально числу соседей (иначе его очередь задач будет постоянно возрастать за счет большого числа задач, посылаемых его соседями). Конкретные значения этих коэффициентов пропорциональности обсуждаются при описании особенностей программной реализации данной системы. Для того, чтобы выравнивать времена пребывания различных задач в очереди на решение, после каждого шага пересылки задачи упорядочиваются в очереди в соответствии со временами поступления заявок на их решение, а пересылаемые задачи выбираются из начала очереди, так что у ранее прибывшей задачи больше шансов на ее передачу на решение.

Архитектура системы представлена на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Агенты, ответственные за реализацию механизма самоорганизации, образуют P2P-оверлейную сеть и взаимодействуют через распределенную P2P-агентскую платформу [13–15], экземпляры которой, в свою очередь, образуют оверлейную сеть. В рассматриваемой многоагентной системе все агенты играют одну и ту же роль, которой поставлено в соответствие имя *GridAgent*. Данная роль имеет два сценария поведения — циклическое проактивное поведение и сценарий приема сообщения со списком задач от другого агента. Оба сценария описываются далее в контексте особенностей программной реализации прототипа системы. Агенты работают и взаимодействуют в асинхронном режиме.

Распределенная P2P-агентская платформа имеет стандартную FIPA-совместимую архитектуру [6], ориентированную на сервис. Она поддерживает таблицы белых и желтых страниц и механизмы распределенного поиска агентов и сервисов. Обмен сообщениями между агентами поддерживается с помощью

оверлейной сети P2P-провайдеров. Взаимодействие P2P-провайдеров выполняется через эмулятор распределенной P2P-коммуникационной сети [16], который позволяет эмулировать работу распределенной сети на одном компьютере и при этом выполнять все необходимые оценки производительности системы (например, оценки загрузки коммуникационных каналов сообщениями, генерируемыми в процессе работы программного прототипа). Иначе говоря, благодаря этому эмулятору система работает так, как если бы каждый агент находился на отдельном компьютере.

### 3. Особенности программной реализации прототипа системы

Все инфраструктурные компоненты разработанного программного прототипа, а именно, распределенная FIPA-совместимая P2P-агентская платформа, эмулятор распределенной P2P-коммуникационной сети пиров (см. ниже) и генератор конфигурации сети разработаны в лаборатории интеллектуальных систем СПИИРАН [13–16]. Они используются в качестве инструментальной поддержки процессов программного прототипирования не только в данной разработке, но и в других разработках многоагентных приложений.

В дальнейшем под сетью узлов будет пониматься ее симуляционная модель. В текущей разработке каждому узлу сети ГРИД поставлен в соответствие провайдер P2P-коммуникаций (далее он для краткости называется *пиром*), каждому пиру — экземпляр P2P-агентской платформы, а каждому экземпляру платформы — единственный прикладной агент (помимо агентов сервисов белых и желтых страниц, которые присутствуют на каждом экземпляре платформы). Таким образом, в данной модели топология оверлейной сети агентов в точности повторяет топологию ГРИД. Естественно, что это касается только рассматриваемого случая архитектуры ГРИД, а в общем случае это может быть и не так.

Все используемые инструментальные средства, а также компоненты программного прототипа написаны на языке C++ с использованием библиотек STL, POCO, wxWidgets, Boost. Модули агента и модуль *GridControlModule*, ответственный за эмуляцию внешней среды, генерирующей поток задач (заявок), разработаны преимущественно с использованием библиотеки wxWidgets; моделирование случайных процессов осуществляется на основе библиотеки Boost.

Программный прототип включает в себя следующие модули (часть из них показана на рис. 2):

- *VirtualEnvironment (VE)* — этот модуль реализует моделирование P2P-коммуникационной среды, обеспечивая возможность коммуникации пиров, и, соответственно, взаимодействия экземпляров агентской платформы (через коммуникации пиров) и прикладных агентов сети;

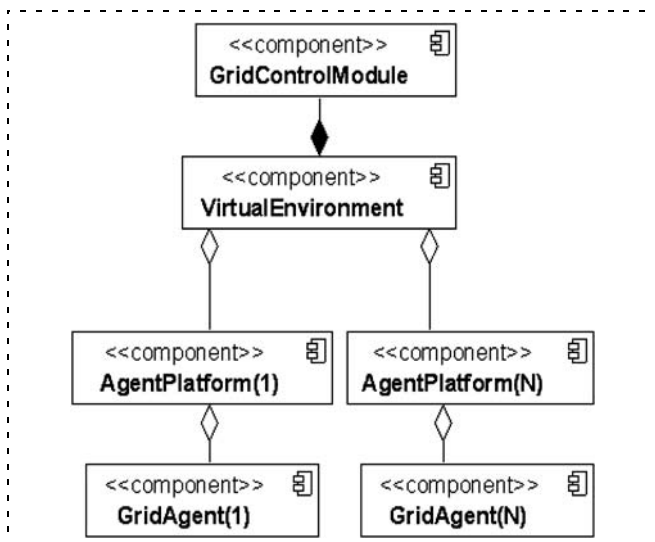


Рис. 2. Модули программного прототипа

- *Peer* — провайдер P2P-коммуникаций (именно он в данной работе называется пиром). На рис. 2 он не показан, так как в существующей реализации P2P-агентской платформы он доступен агентской платформе через "фабрику пиров" [6], а все взаимодействия с этой компонентой инкапсулированы в компонентах *VirtualEnvironment* и *AgentPlatform*. Описание механизма взаимодействия пира и платформы можно найти в [17];
- *AgentPlatform* — агентская платформа, которая предоставляет агентам сервисы желтых и белых страниц, а также сервис отправки сообщений. Напомним, что в рассматриваемой реализации на каждом экземпляре агентской платформы имеется только один прикладной агент;
- *GridAgent* — прикладной агент вычислительного узла;
- *GridControlModule* — внешний модуль компоненты *VE*, который реализует внешнюю среду агентов (генерацию и распределение потока задач с заданными распределениями, генерацию появления узлов в сети и генерацию их ухода из нее) и осуществляет мониторинг системы в целях сбора информации о характеристиках агентов, их очередях и о статистике потока сообщений, проходящих через коммуникационную среду. Соответственно, этот модуль может работать с агентами напрямую, ограничивая свои функции эмуляцией внешней среды и мониторингом. С модельной точки зрения он не является компонентой прикладного агента.

В библиотеке агента присутствуют следующие классы (они представлены на рис. 3):

- *GridAgent* — класс агента;
- *CgbTask* — класс задачи;
- *CgbTaskList* — класс списка (очереди) задач;
- *CgbProactivity* — класс, инкапсулирующий поток проактивного поведения;
- *CgbFileLogger* — класс, который выполняет ведение журнала (лога), фиксирующего работу агента.

Детали описания полей этих классов здесь опускаются. Они частично указаны на рис. 3.

Агент реализует также функции, необходимые для моделирования присутствия/отсутствия вычислительного узла в сети. К ним относится функция *Suspend()*, которая приостанавливает работу проактивного сценария; отмечает в сервисе агента на желтых страницах, что агент перешел в неактивное состояние, после чего он для своих соседей "перестает существовать". Другая функция, *Resume()*, отмечает в сервисе агента на желтых страницах, что агент перешел в активное состояние; возобновляет сценарий его проактивного поведения, в результате чего возобновляется присутствие узла в сети.

*Онтология* системы содержит единственное понятие, а именно, понятие задачи *Task*, которое содержит следующие поля:

- *name*: *wxString* — имя задачи;
- *exectime*: *unsigned int* — длительность исполнения задачи на эталонном компьютере (узле);
- *timestamp*: *unsigned int* — время поступления задачи в систему (выражено в системном времени моделирующего компьютера, которое при необходимости может быть преобразовано в реальное календарное время).

В текущей реализации программного прототипа присутствует только одна *роль*, а именно, роль *GridAgent*, которую исполняют все агенты системы.

В системе пока используется только один протокол взаимодействия агентов, а именно, протокол пересылки задачи (реально — пересылки ссылки на нее) от одного агента другому (назовем этот протокол *Send\_task*). Этот протокол содержит единственный коммуникационный акт, содержание которого — это пересылка одной задачи одному агенту. В архитектуре P2P-платформы используются ACL сообщения [18]. Сообщение протокола *Send\_task* имеет следующую структуру (поскольку в протоколе посылается единственное сообщение, в котором имеется единственное понятие, то заполнять другие поля нет смысла):

- *performative* = *task*;
- *protocol* = *Send\_task*;
- *sender* = *имя агента-отправителя*;

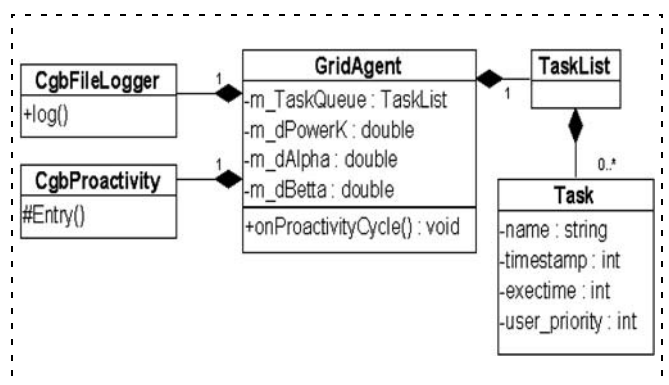


Рис. 3. Диаграмма классов агента

- *receiver* = имя агента-получателя;
- *content* = строковое представление имени пересылаемой задачи;
- *message\_id* = уникальный цифробуквенный идентификатор сообщения.

Опишем далее основные сценарии использования (use cases) роли агента. Она используется в трех типах сценариев:

- *инициализация* — зарегистрировать на желтых страницах сервис с типом *GridAgent* и параметром "available" = false (именно этот параметр служит индикатором присутствия узла в сети); инициализировать внутренние переменные;
- *прием сообщения* — извлечь из сообщения имя передаваемой задачи и поместить ее в очередь на решение. Данный сценарий выполняется каждый раз при обработке принятого сообщения. Ввиду многопоточности доступа к очереди задач этот сценарий, в текущей реализации, выполняется только в то время, когда не выполняется сценарий проактивного поведения. Иначе говоря, сообщения, полученные в период исполнения сценария проактивного поведения, будут ждать обработки до его окончания;
- *проактивное поведение* — сценарий управления очередью задач и их исполнением. Он исполняется в отдельном потоке (класс *CgbProactivity*; функция, реализующая сам цикл проактивного поведения, а именно, функция *onProactivityCycle()*, определена в классе агента). Сначала выполняется цикл работы, затем поток переходит в режим ожидания на некоторый промежуток времени (если время цикла задано числом *iCycleTime*, а на цикл работы было затрачено *iSpentTime*, то поток будет находиться в ожидании следующего цикла ровно  $(iCycleTime - iSpentTime)$  мс, если эта величина больше 0, иначе — 0). Цикл работы, упрощенная диаграмма последовательностей

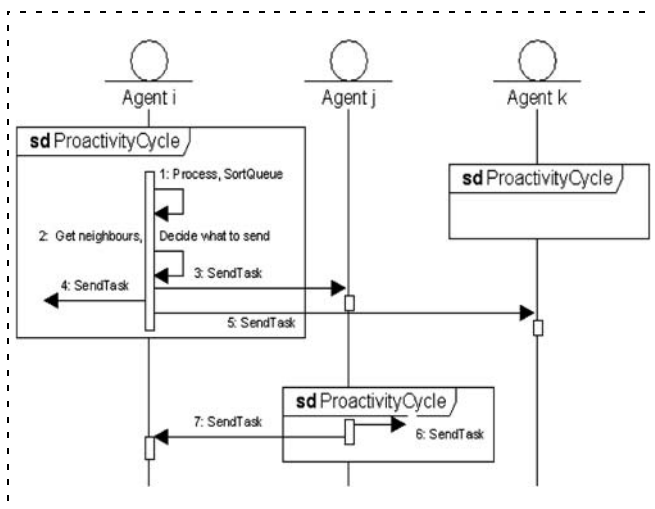


Рис. 4. Диаграмма последовательностей сценария проактивного поведения.

действий которого представлена на рис. 4, содержит следующие шаги:

1) сортировка собственной очереди задач агента по возрастанию времени поступления задач из внешней среды;

2) обработка задачи вычислительным узлом. С точки зрения моделируемой системы очередью задач обладает вычислительный узел (компьютер узла), а не агент. Однако в модели его деятельность по обработке задач эмулируется агентом, хотя в реальной системе функции агента ограничиваются обработкой очереди (упорядочивание задач в ней) и взаимодействием с соседями в процессах пересылки и получения задач. Выборка задачи из очереди на обработку в реальной системе также должна проводиться средствами самого узла, а не агента. Однако ввиду того, что распределенная сеть обработки задач в прототипе эмулируется на одном компьютере, названные выше задачи, которые нехарактерны для агента, здесь возлагаются на него как вспомогательные задачи. Предполагается, что время исполнения задачи на эталонном узле известно из описания задачи, а время ее исполнения в текущем узле пропорционально отношению вычислительной мощности данного и эталонного узлов. Напомним, что в реальности это значение неизвестно, и потому оно не может использоваться агентом в механизме управления нагрузкой (в механизме самоорганизации). В реализованном прототипе оно используется только при симуляции процессов обработки, и становится известным агенту только после окончания решения задачи<sup>1</sup>.

Эмуляция обработки задач узлом происходит следующим образом. Обозначим символом  $T_{next}$  значение времени окончания обработки той задачи, которая в текущий момент обрабатывается узлом. Если текущее значение системного времени  $T_{current}$  равно или превышает значение переменной  $T_{next}$ , то из головы очереди на решение подается очередная задача. После этого вычисляется новое значение  $T_{next}$ . Его значение получается увеличением текущего значения  $T_{current}$  на величину времени решения задачи, взятой на решение, которое вычисляется с учетом коэффициента мощности данного компьютера по отношению к эталонному компьютеру;

3) получение списка имен соседей. Эта задача решается путем запроса на поиск сервиса с типом *GridAgent*. В параметрах запроса указывается, что поиск необходимо проводить только на экземплярах платформы, расположенных на соседних пирах;

4) расчет числа задач, которые необходимо отправить. Расчет проводится по формуле  $N = \alpha Q + \beta M$ , где  $N$  — общее число задач, которое агент пересылает соседям в текущем цикле,  $Q$  — длина собственной очереди задач агента в текущий момент,

<sup>1</sup> Понятно, что это время является случайной величиной, однако в данном случае в целях упрощения модели этот факт игнорируется.

The screenshot shows a window titled "Grid Control Frame" with a sidebar on the left containing buttons "Show Agents" and "GenerateScenario", and status information: "Time=56348", "Processed=18", and "Enqueued=56". The main area contains a table with the following columns: Peer, C, State, Queue, ATT, Max, Min, In, ENW, Out, Neighbours, and LW. The table lists 20 agents (agent-1 to agent-20) and their corresponding peers (peer-1 to peer-20) with various numerical and categorical values.

	Peer	C	State	Queue	ATT	Max	Min	In	ENW	Out	Neighbours	LW
agent-1	peer-1	11	On	4	7379	10749	5075	2	2	4	agent-18; agent-13; agent-15; agent-16;	21430
agent-10	peer-10	11	On	4	5487	10977	1638	1	3	0	agent-8; agent-3; agent-2;	9090
agent-11	peer-11	0	Off	0	0	0	0	0	0	0		0
agent-12	peer-12	11	On	0	0	0	0	0	0	0		0
agent-13	peer-13	11	On	4	8170	20876	1756	2	2	0	agent-1; agent-8;	5244
agent-14	peer-14	11	On	1	15195	15195	15195	1	0	3	agent-18; agent-2;	12467
agent-15	peer-15	11	On	0	0	0	0	0	0	0	agent-17; agent-1;	2049
agent-16	peer-16	11	On	2	13482	19005	7959	2	0	0	agent-7; agent-1; agent-18;	7470
agent-17	peer-17	12	On	0	0	0	0	0	0	0	agent-15;	477
agent-18	peer-18	11	On	7	6175	10783	2399	3	4	4	agent-14; agent-16; agent-1;	6896
agent-19	peer-19	0	Off	0	0	0	0	0	0	0		0
agent-2	peer-2	11	On	2	10706	12826	8587	2	0	1	agent-8; agent-5; agent-20; agent-14; agent-10;	5685
agent-20	peer-20	11	On	2	5585	8388	2783	1	1	0	agent-3; agent-2; agent-9;	6456
agent-3	peer-3	11	On	4	3344	5262	2099	0	4	0	agent-10; agent-20;	2387
agent-4	peer-4	0	Off	0	0	0	0	0	0	0		0
agent-5	peer-5	12	On	1	3960	3960	3960	0	1	0	agent-2;	269
agent-6	peer-6	0	Off	0	0	0	0	0	0	0		0
agent-7	peer-7	11	On	4	6276	13744	1888	2	2	0	agent-16; agent-8;	10885
agent-8	peer-8	11	On	3	3670	5248	2731	0	3	4	agent-2; agent-10; agent-13; agent-9; agent-7;	4294
agent-9	peer-9	12	On	0	0	0	0	0	0	1	agent-20; agent-8;	3354

Рис. 5. Форма GridControlModule

$M$  — число соседей агента,  $\alpha = 0,2$ ;  $\beta = 0,5$ . В случае, если  $N > Q$ , значение  $N$  принимается равным  $Q$ ;

5) пересылка задач соседям. Задачи посылаются последовательно, и при этом имя получателя очередной задачи выбирается из текущего списка соседей случайным образом на основе равномерного распределения.

*Окружающая среда агентов* представлена в модели модулем *GridControlModule* (рис. 5). Данный модуль имеет графический пользовательский интерфейс и может запускаться из окна *VirtualEnvironment*. В этом интерфейсе представлены таблица агентов, существующих в системе, размеры их очередей, списки их соседей, статус (*on/off*) и другие параметры. Информацию о полной топологии сети без учета активности узла можно получить с помощью средств *VirtualEnvironment*.

*Жизненный цикл* (механизм функционирования) программной системы включает в себя следующие стадии:

1. *Инициализация системы*. При старте модуль *VirtualEnvironment* разворачивает пиры, экземпляры платформы и соответствующих им агентов. При этом конфигурация системы определяется набором конфигурационных файлов виртуальной среды, которые создаются генератором P2P-конфигурации. Он позволяет генерировать топологию сети как случайным образом, когда пользователь устанавливает только число узлов, минимальное и максимальное число соседей узла, а связи генерируются далее автоматически с использованием соответствующего распределения вероятностей, так и вручную. При начальном развертывании сценарий проактивного поведения отключен у всех экземпляров типового агента.

2. *Генерация сценария эксперимента*. Эта задача выполняется модулем *GridControlModule*. В качестве начальных установок в нем выбираются параметры генерации окружающей среды, а именно, средняя длительность задач, длительность процесса моделирования, параметры распределения потока задач, частота поступления задач (в соответствии с распределением Пуассона), параметры распределения вероятностей, определяющего времена "отсутствия" тех или иных узлов в сети. Когда эти установки заданы, генерируется сценарий эксперимента. Сценарий эксперимента, включая установки по начальной конфигурации сети и начальному состоянию очередей задач, задается множеством событий на единой шкале времени, когда все события выстраиваются в одну очередь событий, а эксперимент реализуется по схеме "от события к событию".

3. *Эксперимент*. Модуль *GridControlModule* запускает сценарий проактивного поведения агентов в соответствии с начальной конфигурацией, полученной в сценарии эксперимента, и обрабатывает цепочку событий. Во время эксперимента ведется журнал динамики состояний агентов на различных этапах их жизненного цикла, выполняется мониторинг сообщений, загрузки коммуникационной среды и т. д. Отметим, что циклы работы сценария проактивного поведения разных агентов выполняются асинхронно. В разработанном прототипе эти циклы, в том числе их длительности, идентичны для всех агентов.

*Данная статья частично поддержана проектом № 214 "Алгоритмы обучения для самоконфигурирования динамических P2P сетей", выполняемого СПИИРАН по программе Президиума РАН № 14 "Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация".*

## Список литературы

1. **Bernon C., Chevrier V., Hilaire V., Marrow P.** Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Comparison. *Informatica* 30 (2006). P. 73–82.
2. **Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A.** Self-organization in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*. 2005b. 20 (2). P. 165–189.
3. **Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A.** Self-organisation and emergence in multi-agent systems: An overview // *Informatica*. 2006. 30 (1). P. 45–54.
4. **Mamei M., Menezes R., Tolksdorf R. and Zambonelli F.** Case Studies for Self-Organization in Computer Science // *Journal of System Architecture*. August–September. 2006. V. 52. Iss. 8–9. P. 443–460.
5. **Omicini A. and Gardelli L.** Self-Organisation and MAS: An Introduction. <http://unibo.lgardelli.com/teaching/2007-selforg-mas.pdf>.
6. **Городецкий В. И.** Самоорганизация и многоагентные системы // Принята к публикации в журнале Известия РАН "Теория и системы управления". 2010.
7. **Karuna H., Valckenaers P., Saint-Germain B., Verstraete P., Bala Zamfirescu C., Van Brussel H.** Emergent Forecasting Using a Stigmergy Approach in Manufacturing Coordination and Control. In S. Brueckner et al. (Eds.): Springer-Verlag 2005. ESOA 2004. 3464. P. 210–226.
8. **Karuna H., Valckenaers P., Verstraete P., Saint-Germain B., Van Brussel H.** A Study of System Nervousness in Multi-agent Manufacturing Control System. In S. A. Brueckner et al. (Eds.): Springer-Verlag 2006. ESOA 2005, LNAI 3910. P. 232–243.
9. **Camurri M., Mamei M., Zambonelli F.** Urban Traffic Control with Co-Fields. In D. Weyns, H.V.D. Parunak, and F. Michel (Eds.): Springer-Verlag, 2007. E4MAS 2006, LNAI 4389. P. 239–253.
10. **Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L.** AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. *Europ. Trans. Telecom. (Special Issue on Self-Organization in Mobile Networking 16)*. 2005. P. 443–455.
11. **Jelasiy M., Babaoglu O.** T-Man: Gossip-Based Overlay Topology Management. In S. A. Brueckner et al. (Eds.): Springer-Verlag, 2006. ESOA 2005, LNAI 3910. P. 1–15.
12. **Clarke I., Sandberg O., Wiley B., Andhong T. W.** Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system // *Proc. of the Internat. Workshop on Designing Privacy Enhancing Technologies*. Springer-Verlag, New York. 2000. P. 46–66.
13. **Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В.** Инструментальные средства для открытых сетей агентов // *Известия РАН. Теория и Системы Управления*. 2008. № 3. С. 106–124.
14. **Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В.** Программная инфраструктура для поддержки концепции повсеместных вычислений в многоагентных P2P системах // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2008. № 4. С. 51–56.
15. **Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S.** P2P Agent Platform: Implementation and Testing. In S. Joseph, Z. Despotovich, G. Moro, S. Bergamaschi (Eds.) *Agents and Peer-to-Peer Computing*. LNAI vol. 5319. 2009. P. 41–54.
16. **Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Serebryakov S., Balandin S., Leppanen S., Turunen M.** Virtual P2P Environment for Testing and Evaluation of Mobile P2P Agents Networks // *The 2d Internat. Conf. on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM 2008)*, Valencia. IEEE Computer Society. 2008. P. 422–429.
17. **Peer-to-Peer Agent Platform Guide**. URL: <http://space.ias.spb.su/ap/index.php?me>
18. **FIPA Agent Communication Language Specification**. URL: <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/>

ИНФОРМАЦИЯ

3–8 октября 2011 г.  
в пос. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края состоится

### 4-я Всероссийская мультikonференция ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ—2011)

*Председатель Президиума мультikonференции*  
академик РАН В. Г. Пешехонов

#### Состав мультikonференции

- ♦ **Локальная научно-техническая конференция**  
**"ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И УПРАВЛЕНИЕ" (ИИУ-2011)**  
*Председатель программного комитета конференции* — академик РАН С. Н. Васильев
- ♦ **Локальная научно-техническая конференция**  
**"МЕХАТРОНИКА И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (МЭС-2011)**  
*Председатель программного комитета конференции* — член-корреспондент РАН Е. Д. Теряев
- ♦ **Локальная научно-техническая конференция**  
**"УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ И МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ"**  
**(УРСиМС-2011)**  
*Сопредседатели программного комитета конференции:*  
член-корреспондент РАН И. А. Каляев, член-корреспондент РАН Р. М. Юсупов

Подробная информация о мультikonференции и условиях участия в ней  
размещается на сайте: <http://www.mvs.tsure.ru>

# КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.865.004.94

**Т. Н. Круглова**, канд. техн. наук, доц.,  
Южно-Российский государственный  
технический университет  
(Новочеркасский политехнический институт)  
kruglovatanya@rambler.ru

## Интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, эксплуатируемых в экстремальных условиях

*Описан метод диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов, основанный на использовании аппарата нечеткой логики и нейросетевых технологий. Возможности метода проиллюстрированы примером диагностирования и прогнозирования технического состояния модуля движения шахтного вентилятора. Приведены результаты оценки достоверности и эффективности предложенного метода.*

**Ключевые слова:** нейронечеткий метод диагностирования, нейросетевой метод прогнозирования, интеллектуальный метод диагностирования и прогнозирования

### Введение

В настоящее время активно развиваются отрасли промышленности, связанные с риском для жизни и здоровья человека, снизить который можно применением надежных и эффективных мехатронных комплексов (МК), позволяющих полностью автоматизировать технологические процессы [1]. Но экстремальные условия эксплуатации оборудования — при плохой освещенности, в стесненном рабочем пространстве, с избытками влаги, пыли и вредных газов, при больших динамических знакопеременных нагрузках, под воздействием ионизирующего излучения, химически агрессивных аэрозолей, высокой температуры — приводят к частым отказам оборудования и обуславливают необходимость повышения надежности и эффективности функционирования. Одним из перспективных подходов к решению данной задачи является управление техническим состоянием МК, реализованным на основе методов и средств диагностирования и прогнозирования.

### Диагностирование технического состояния МК

Неисправности, возникшие в МК во время его эксплуатации, выявляются путем измерения одного или нескольких определяющих параметров (ОП), которые в процессе развития дефекта меняют свои значения в интервале от номинальных до критических (отказных). Так как все ОП имеют различные пределы изменения и размерности, то для удобства моделирования их текущие значения целесообразно перевести в относительные единицы  $y'_j \in [0, 1]$  [2].

Известно, что если все значения ОП "близки к 1" то объект исправен или работоспособен, его "можно эксплуатировать". Если хотя бы одно значение ОП "близко к 0" то объект неработоспособен, его "нельзя эксплуатировать". Формализация этих высказываний осуществляется с помощью нечеткой логической системы, входными данными которой являются относительные значения ОП, характеризующих неисправности объекта. Для каждого параметра на интервале  $[0; 1]$  задаются  $Z$ -образная функция принадлежности  $B_2$  — "близко к 0" и  $S$ -образная функция принадлежности  $B_1$  — "близко к 1". На выходе логической модели определяется значение функции диагностирования  $F(x^*)$ , значение которой лежит в интервале  $[-1; 1]$ .

Взаимосвязь между введенными множествами описывается следующими нечеткими правилами:

$R_1$ : если  $y_1$  есть  $B_1$  и ...  $y_m$  есть  $B_1$  то  $x_i = f_1$ ;

$R_2$ : если  $y_1$  есть  $B_2$  или ...  $y_m$  есть  $B_2$ , то  $x_i = f_2$ ,

где  $y_1, \dots, y_m$  — ОП;  $x_i$  — неисправность объекта диагностирования;  $f_1$  — заключение "объект допускается к эксплуатации";  $f_2$  — заключение "объект не допускается к эксплуатации".

Для преобразования четких входных значений в четкие выходные используется алгоритм нечеткого логического вывода *Takagi—Sugeno* [2].

Приведенная подмодель позволяет оценить только одну неисправность модуля, в то время как он может иметь несколько неисправностей. Для комплексной оценки технического состояния необходимо составить аналогичные подмодели для каждой неисправности МК, получив множество текущих коэффициентов развития его неисправностей  $A = \{x_i^*\}$ ,  $i \in [1, n]$ , а затем аппроксимировать полученные выходы подмоделей. Так как развитие любой неисправности приводит к отказу МК, то в качестве аппроксимирующей функции выбрана функция минимума. Для решения задачи аппроксимации моделируется радиальная базисная сеть. Ее входной слой осуществляет распределение данных

образа для скрытого слоя весов, состоящего из радиальных базисных нейронов, использующих функцию активации Гаусса, отображения которых подаются на выходной слой линейных нейронов. По исходному вектору  $A = \{x_i^*\}$  текущего развития и неисправностей модуля и матрице весов  $W = \{w_{ij}\}$  определяются расстояния между  $i$ -м вектором входа  $A$  и  $i$ -м вектором-строкой матрицы весов  $W$ , которая поэлементно умножается на вектор смещения  $b$  и формируется вход функции активации  $net_i$ . Выход радиального базисного нейрона вычисляется по формуле

$$F(x_i^*) = F(net_i) = \exp(-net_i)^2 = \exp\left(-\left(\sum_{i=1}^n (x_i^* - w_{ij})^2\right)^{1/2} b\right)^2.$$

Структура реализации нейронечеткого метода диагностирования [3] представлена на рис. 1.

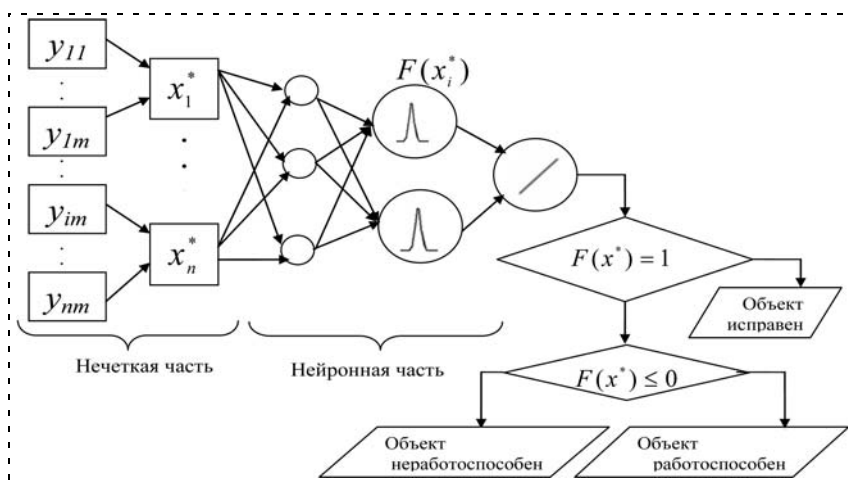


Рис. 1. Структура реализации нейронечеткого метода диагностирования



Рис. 2. Структура прогнозирования технического состояния мехатронного комплекса

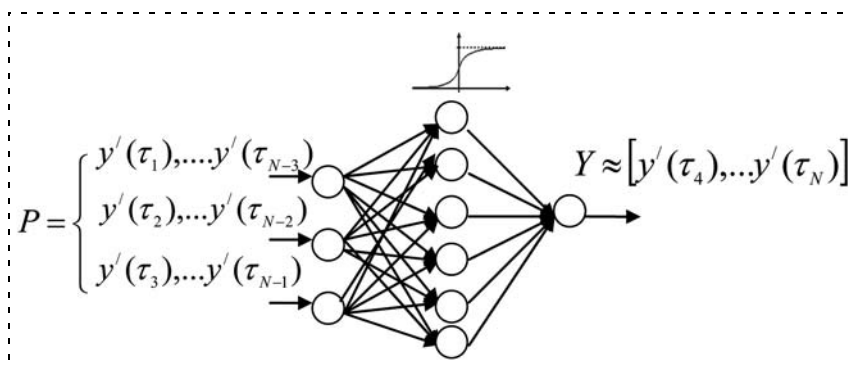


Рис. 3. Общий вид нейронной сети прямой передачи сигнала

Полученное значение функции принадлежности позволяет оценить текущее состояние объекта, отнести его к одному из следующих видов:  $F(x^*) = 1$  — исправен;  $0 < F(x^*) < 1$  — работоспособен;  $-1 \leq F(x^*) \leq 0$  — неработоспособен.

### Прогнозирование технического состояния МК

В случае работоспособности МК осуществляются краткосрочный и долгосрочный прогнозы его технического состояния. МК является сложной системой, состоящей из нескольких взаимосвязанных модулей. Каждый модуль состоит из нескольких узлов (блоков). Каждый блок имеет несколько неисправностей. Каждая неисправность выявляется путем изменения нескольких ОП. Следовательно, процесс прогнозирования необходимо вести в обратной последовательности. Прогноз имеет пять уровней (рис. 2).

Прогнозирование со второго по пятый уровень происходит аналогично и сводится к аппроксимации выходов предыдущего уровня. Поэтому весь процесс прогнозирования состояния МК может быть выполнен в два этапа: прогнозирование значений ОП и аппроксимация выходов сетей предыдущих уровней. Исходными данными для прогнозирования являются относительные значения ОП в предшествующие моменты времени, распределенные по равным интервалам времени  $y'(\tau_i)$ ,  $i \in [1, N]$ , составляющие обучающую выборку сети.

Прогнозирование на первом этапе осуществляется с помощью принципа окон, для практической реализации которого моделируется сеть прямой передачи сигнала, имеющая три входа и один выход (рис. 3).

По заданному входу  $P$  нейронная сеть вычисляет выходное значение определяющего параметра  $Y$ , которое должно соответствовать заданному вектору цели  $H = [y'(\tau_4), \dots, y'(\tau_N)]$ , и для каждого значения ОП находит рассогласование  $e = Y - H$ , которое равно разности между полученным и желаемым значениями. Для обучения сети использован алгоритм обратного распространения ошибки [4], позволяющий минимизировать среднеквадратическое отклонение текущих от требуемых выходов многослойных нейронных сетей. Результаты обучения и работы сети прогнозирования представлены на рис. 4.

Для нахождения значения ОП в следующий период времени задается входной вектор-столбец, содержащий



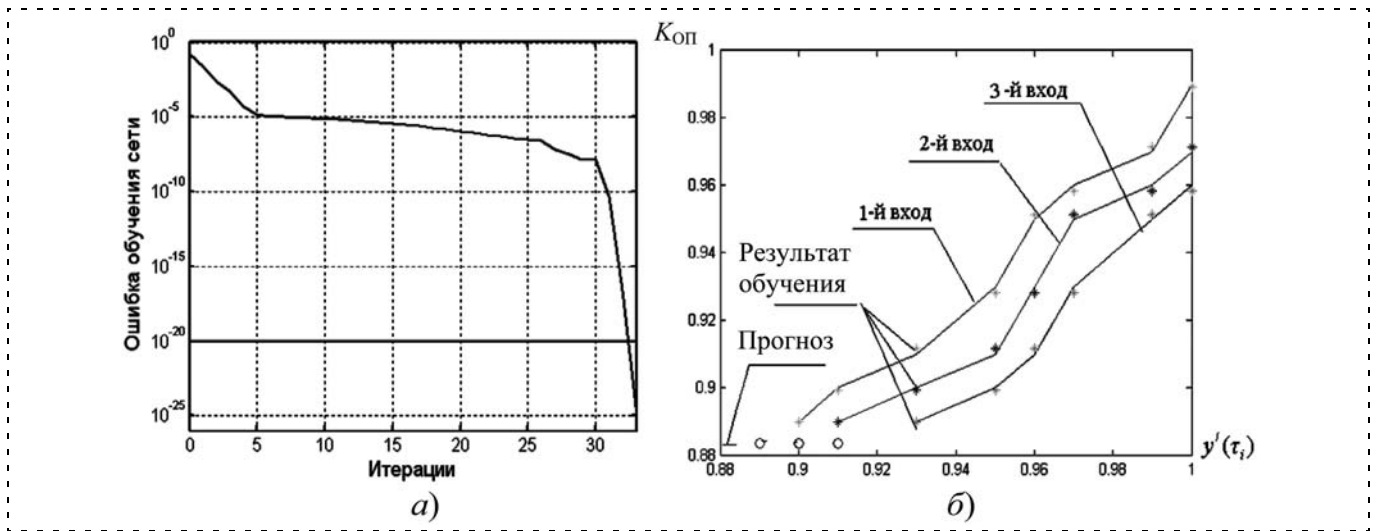


Рис. 4. Результаты обучения (а) и работы (б) сети прогнозирования

три последних значения обучающей выборки  $C = [y'(\tau_{N-2}); y'(\tau_{N-1}); y'(\tau_N)]$ . На выходе получается относительный коэффициент спрогнозированного значения ОП  $K_{ОП}$  в последующий интервал времени:

$$K_{ОП_j} = 1 / \left( 1 + \exp \left( \sum_{i=1}^N W_i P(y(\tau_i)) \right) \right),$$

где  $j = \overline{1, m}$ ,  $m$  — число ОП МК;  $W_i$  — веса нейронов скрытого слоя.

Если  $K_{ОП} \leq 0$ , то данный определяющий параметр выйдет за пределы допустимых значений до достижения следующего интервала времени. Если  $K_{ОП} > 0$ , то в следующий интервал времени параметр останется в пределах допустимых значений.

Прогнозирование на следующих уровнях заключается в аппроксимации выходов сетей предыдущих уровней и реализуется с помощью радиальных базисных сетей. В качестве вектора цели задается функция минимизации входа.

$$K_{н.э_j} = \min \left( \exp \left( - \left( \sum_{j=1}^m W_{ij}^1 - K_{ОП_j} \right)^2 \right)^{1/2} b \right)^2;$$

$$K_{н.б_h} = \min \left( \exp \left( - \left( \sum_{i=1}^n W_{hi}^2 - K_{н.э_j} \right)^2 \right)^{1/2} b \right)^2;$$

$$K_{н.м_k} = \min \left( \exp \left( - \left( \sum_{h=1}^M W_{kh}^3 - K_{н.б_h} \right)^2 \right)^{1/2} b \right)^2;$$

$$K_{н.к} = \min \left( \exp \left( - \left( \sum_{k=1}^K W_k^4 - K_{н.м} \right)^2 \right)^{1/2} b \right)^2,$$

где  $K_{н.э_j}$ ,  $K_{н.б_h}$ ,  $K_{н.м_k}$ ,  $K_{н.к}$  — коэффициенты развития неисправностей элементов, блока, модуля и

комплекса;  $W_{ij}^1$ ,  $W_{hi}^2$ ,  $W_{kh}^3$ ,  $W_k^4$  — весовой вектор первой (развитие неисправности), второй (состояние блока), третьей (состояние модуля) и четвертой (состояние комплекса) ступеней аппроксимации.

Для определения времени отказа МК необходимо добавить спрогнозированные значения ОП в обучающую выборку и повторять весь процесс прогнозирования до тех пор, пока коэффициент, определяющий состояние МК,  $K_{н.к} > 0$ . Число проделанных итераций будет равно числу интервалов времени  $T$ , в течение которого МК сохранит работоспособность.

Схема реализации вышеприведенного метода приведена на рис. 5.

Представленный метод прогнозирования позволяют спрогнозировать значение ОП, развитие неисправностей, состояние блоков и модуля и МК на один или несколько периодов эксплуатации.

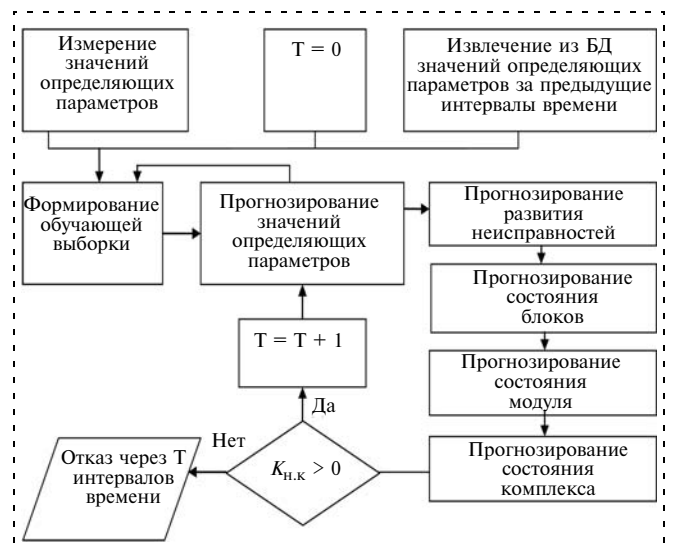


Рис. 5. Схема реализации нейросетевого метода прогнозирования технического состояния

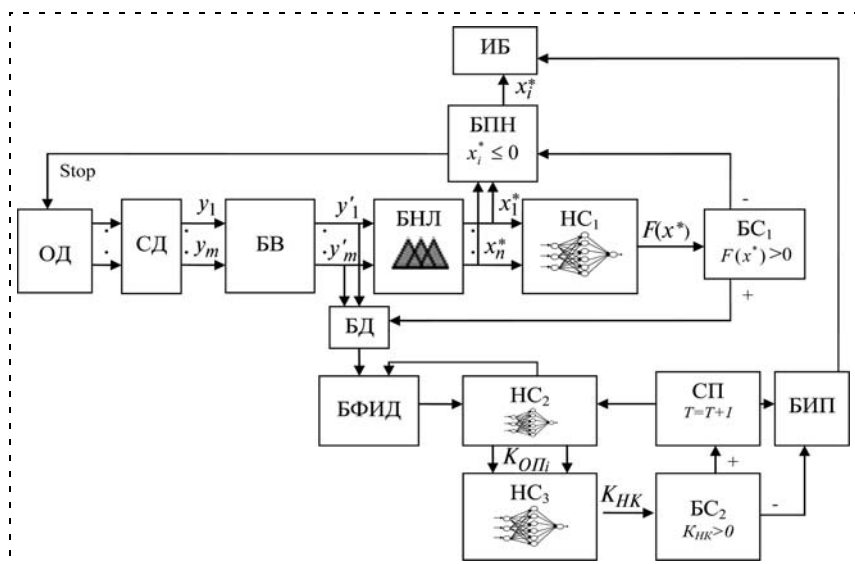


Рис. 6. Структура интеллектуальной системы диагностирования и прогнозирования технического состояния мехатронных комплексов

### Структура интеллектуального метода диагностирования и прогнозирования технического состояния

Для практической реализации управления по результатам диагностирования и прогнозирования состояния МК необходимо разработать интеллектуальную систему, позволяющую осуществить сбор исходной информации, ее необходимую подготовку и обработку с помощью предложенных методов. Структура такой системы представлена на рис. 6.

С объекта диагностирования (ОД) с помощью системы датчиков (СД) снимаются текущие значения ОП, которые передаются в блок вычислений (БВ), где переводятся в относительные единицы ( $y'_1, \dots, y'_m$ ). Полученные относительные значения ОП записываются в базу данных (БД) и передаются в блоки нечеткой логики (БНЛ), в которых происходит определение текущего развития неисправностей ( $x_1^* \dots x_n^*$ ). Полученные значения подаются на вход нейронной сети аппроксимации (НС<sub>1</sub>), вычисляющей функцию диагностирования  $F(x^*)$ , значение которой подается на вход блока сравнения (БС<sub>1</sub>). Если  $F(x^*) \leq 0$ , то объект неисправен, подается сигнал на блок поиска неисправностей (БПН), где выбираются коэффициенты развития неисправности, меньше или равные 0. Выявленные неисправности подаются на индикаторный блок (ИБ), и формируется управляющее воздействие на отключение ОД.

Если  $F(x^*) > 0$ , то из БД извлекаются значения ОП за предыдущие и текущий моменты времени и подаются на блок формирования исходных данных (БФИД), где формируется обучающая выборка и задается начальный период сохранения работоспособности ( $T = 0$ ). Полученные данные подаются на вход нейронной сети прогнозирования (НС<sub>2</sub>), вычисляющей  $K_{ОПi}$  на следующий интервал функционирования. Полученные значения  $K_{ОПi}$  подаются

на вход четырехуровневой сети аппроксимации (НС<sub>3</sub>), вычисляющей коэффициент  $K_{НК}$ . Значение данного коэффициента подается на блок сравнения (БС<sub>2</sub>), где происходит его дальнейшая оценка.

Если  $K_{НК} > 0$ , то в следующий период эксплуатации объект сохранит работоспособность. В счетчике периодов (СП) происходит наращивание периода работоспособности ( $T = T + 1$ ), текущее значение  $T$  отражается на блоке индикации периодов (БИП). Прогнозные значения ОП добавляются в обучающую выборку, и весь процесс прогнозирования повторяется до тех пор, пока  $K_{НК}$  не станет меньше или равен нулю. В случае, если  $K_{НК} \leq 0$ , текущее число периодов  $T$  с БИП подается на ИБ (экран монитора).

### Практическая реализация метода

Предложенный метод исследован на модуле движения шахтного вентилятора главного проветривания по результатам измерения значений виброскорости в четырех контрольных точках по трем ортогональным направлениям (рис. 7) в номинальном режиме работы объекта.

Оценка результатов измерений, выполненная на основе нейронечеткого метода диагностирования с помощью программы "КАСДиП" [5], показала работоспособность объекта. Результат оценки достоверности и точности диагностирования показал, что вероятность ложного отказа составляет 0,94 %, вероятность необнаружения отказа — 0,38 %, достоверность диагностирования — 98,7 %.

Прогнозирование технического состояния вентилятора осуществляется на основе данных замеров виброскорости за предыдущие периоды эксплуатации. В результате расчетов получено, что вентилятор сохранит работоспособность в течение пяти периодов. Графическая интерпретация сравнения реальных и прогнозных значений виброскорости приведена на рис. 8 (см. третью сторону обложки).

Из проведенного анализа видно, что погрешность краткосрочного прогнозирования не превы-

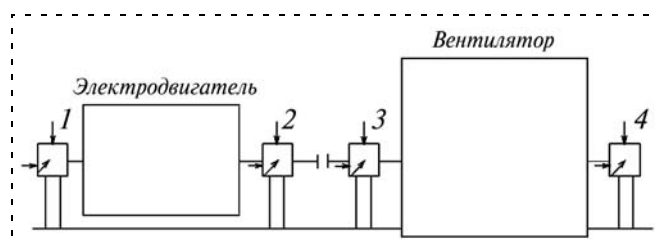


Рис. 7. Кинематическая схема контроля параметров вибрации вентилятора главного проветривания:

1, 2 — подшипники скольжения электродвигателя; 3, 4 — подшипники качения вентилятора

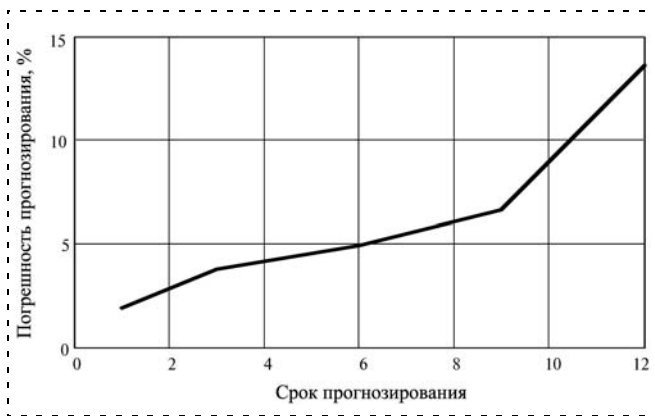


Рис. 9. Погрешность долгосрочного прогнозирования

шает 5 %, а среднее относительное отклонение составляет менее 1 %, что свидетельствует о высокой точности прогноза. Оценка достоверности прогнозирования показала, что среднеквадратическое отклонение прогнозируемого параметра составляет 9,5 %, среднеквадратическое отклонение прогнозируемого остаточного ресурса — 2,2 % при доверительной вероятности 0,95.

Оценка результатов долгосрочного прогнозирования показала, что среднее отклонение прогнозного значения ОП увеличивается с увеличением числа итераций (рис. 9). Результат долгосрочного

прогнозирования может быть скорректирован заменой прогнозных значений ОП в обучающей выборке реальными.

Оценка эффективности показала, что внедрение предложенных методов позволяет повысить производительность объекта на 17...18 %, коэффициент технического использования — на 14 % и получить экономический эффект в случае, если затраты на модернизацию не превышают 20 % стоимости объекта.

#### Список литературы

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособ. для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzy-logic/book1/>
3. Круглова Т. Н. Нейронечеткий метод повышения эффективности функционирования мехатронных модулей движения горного оборудования // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. 2008. Спец. вып. Проблемы мехатроники. 2008. С. 71—75.
4. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Пер. с англ. Ю. А. Зуева, В. А. Точенова, под ред. А. Н. Галущкина. М.: 1992.
5. Глебов Н. А., Круглова Т. Н. Комплексная автоматизированная система диагностирования и прогнозирования "КАС-ДиП": Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 8240 / Отрасл. фонд автор. права. Зарег. 27.04.2007; выдано 06. 06.2007.

УДК 519.1 : 621

**Д. М. Шпрехер**, канд. техн. наук, доц.,  
Новомосковский институт

РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Новомосковск  
shpreher-d@yandex.ru

## Нейросетевые оптимизационные модели поиска неисправностей электромеханических систем

*Представлены нейросетевые модели, использующие отображения двумерного распределения проверок электромеханических систем в пространстве временных параметров на одномерный кольцевой маршрут их следования. В модели сети Хопфилда программа элементарных проверок кодируется активностью нейронов, связи между которыми подбираются так, чтобы энергия сети оказалась связанной с суммарным временем поиска.*

**Ключевые слова:** электромеханическая система, поиск неисправностей, нейросетевая модель

### Введение

Многообразие факторов, являющихся причиной отказов электромеханических систем (ЭМС) как сложных систем, не позволяет составить их абсолютно полный перечень. Решать задачу поиска не-

исправностей путем обычных комбинаторных методов контроля работоспособности качественно не всегда удается. Это объясняется тем, что контроль всегда идет по небольшому числу обобщенных параметров. А на один обобщенный параметр всегда заведены возможные неисправности многих блоков и приборов ЭМС. Увеличение же числа измеряемых параметров неизбежно ведет к увеличению массы кабельной сети системы диагностики и, как следствие, к большим временным затратам. Синтез оптимальных поисковых процедур позволяет совершенствовать систему поиска неисправностей ЭМС за счет парирования комбинаторного взрыва при нейросетевой оптимизации.

### Минимизация времени поиска неисправностей ЭМС на основе моделей карт Кохонена

Синтез программы поиска неисправностей ЭМС с использованием моделей карт Кохонена основан на представлении программы проверок графом задачи коммивояжера. При этом, если граф проведения всех измерений или всех проверок — эйлеров, то задача нейросетевой модели карты Кохонена — оптимизация эйлерова обхода вершин данного графа (где вершины — вид проверки, дуги — временные затраты на реализацию проверки) без возврата в на-

чальное состояние. Законы обучения карты Кохонена, относящиеся к категории соревновательных, обладают тем свойством, что возникает соревновательный процесс между нейронами слоя Кохонена, представляющими вершины эйлера графа. Те элементы, которые оказываются победителями соревнования, получают право изменять свои веса, в то время как проигравшие свои веса не меняют (или меняют по другому правилу).

В основе нейросетевого алгоритма поиска оптимальной последовательности измерений выходных параметров ЭМС предлагается использовать обучающую процедуру [1], которая состоит из следующих этапов:

1. На этапе инициализации всем весовым коэффициентам нейронов в слое Кохонена  $w_{xj}$  и  $w_{yj}$  модели синтеза оптимальной программы измерений присваиваются случайные значения в интервале  $[0, 1]$ .

2. На входы нейронной сети (НС) подается входной образ, характеризующий параметры каждого измерения на графе технических состояний ЭМС, после чего для каждого нейрона рассчитывается взвешенная сумма его входов, к которой затем применяется активационная (передаточная) функция нейрона:

$$f(x) = -0,5 + 1/(1 + e^{-a\Sigma}),$$

где  $\Sigma$  — взвешенная сумма входов нейронов;  $a$  — коэффициент крутизны сигмоидной функции активации.

3. Каждый узел сети (карты) вычисляет входную интенсивность  $D_j$  в соответствии со следующим выражением (либо его модификациями в заданной метрике):

$$D_j = (x_i - w_{xj})^2 + (y_i - w_{yj})^2, i = \overline{1, N},$$

где  $i$  — число примеров на входе;  $j$  — индекс нейрона в слое Кохонена;  $x_i$  и  $y_i$  — два нейрона в распределительном слое, позволяющие подавать на НС двумерные координаты обучающих примеров.

Как только вычислены все выходные интенсивности, определяется нейрон-победитель, который обеспечивает наименьшее в выбранной метрике расстояние  $D_k = \min_j \{D_j\}$ , где  $k$  — номер нейрона-победителя.

Затем в соответствии с функцией притяжения модифицируются весовые коэффициенты нейронной сети по формулам

$$\begin{cases} w_{xj}(t+1) = w_{xj}(t) + \text{dist}(i, j)\beta(x_i - w_{xj}(t)); \\ w_{yj}(t+1) = w_{yj}(t) + \text{dist}(i, j)\beta(y_i - w_{yj}(t)), j = \overline{1, N}, \\ \text{dist}(i, j) = \min(\text{dist}\downarrow(i, j), \text{dist}\uparrow(i, j)), \end{cases}$$

где  $w_{xj}$ ,  $w_{yj}$  — весовые коэффициенты межнейронных связей  $x_i$ -го и  $y_i$ -го нейронов в слое Кохонена;  $\beta$  — коэффициент скорости обучения нейронной модели;  $t$  — номер итерации;  $\text{dist}$  — функция со-

седства, представляющая собой любую невозрастающую функцию от расстояния (в целочисленной нумерации) между нейроном-победителем и соседними нейронами;  $\text{dist}\downarrow(i, j)$  — топологическое расстояние между нейронами, интерпретируемое как проверка, при их обходе по часовой стрелке, а  $\text{dist}\uparrow(i, j)$  — против. В этом случае  $\text{dist}$  — это вектор попарных расстояний между проверками. В итоговом векторе расстояний берется минимальная компонента из двух сравниваемых.

В алгоритме поиска из этих двух формул выбирается та, при которой (при заданных исходных обучающих массивах) достигается более быстрый и точный результат обучения.

4. После согласования и коррекции весов для предъявленного входного образа выбирается следующий входной вектор, и процесс повторяется рекурсивно. Обучение продолжается до получения желаемой степени согласования весовых векторов и входных векторов. После этого сеть считается обученной и пригодной для эксплуатации, так как каждой вершине графа проверок будет поставлен в соответствие хотя бы один нейрон слоя Кохонена.

5. На вход НС предъявляются все образы, характеризующие параметры каждого измерения на графе технических состояний ЭМС из входного набора данных. Вид откликов на каждый класс — номера "выигравших" нейронов — образуют замкнутый маршрут проверок параметров технического состояния ЭМС, являющийся оптимальной программой измерений. Иными словами, подавая на вход НС координаты любой проверки во временном пространстве, на выходе получаем номер отклика нейрона, свидетельствующий о порядке данной проверки в программе оптимизации поиска неисправностей ЭМС.

При синтезе оптимальной по времени программы поиска неисправностей предлагается использовать НС, состоящую из двух одномерных слоев нейронов (т. е. содержащую лишь один слой синаптических весов). Входной слой состоит из двух нейронов, а выходной — из  $N$  (по числу элементарных проверок программы поиска неисправностей ЭМС, рис. 1). Каждый вход имеет соответствующий ему весовой коэффициент. Когда на слой элементов поступает входной вектор, между элементами возникает конкуренция, какой из весовых векторов ближе (в смысле какой-либо меры) к входному вектору, в качестве которого выступают параметры элементарной проверки. Весовой вектор элемента-победителя сдвигается по направлению к входному вектору  $(x_i, y_i)$ .

Таким образом, по мере поступления новых параметров элементарных проверок ЭМС весовые векторы сети разделяются на группы, формирующиеся в виде облаков вокруг входных векторов. По мере обучения плотность весовых векторов будет выше в тех позициях пространства, где входные векторы появляются чаще, и ниже там, где они появляются реже. В результате, сеть Кохонена адап-

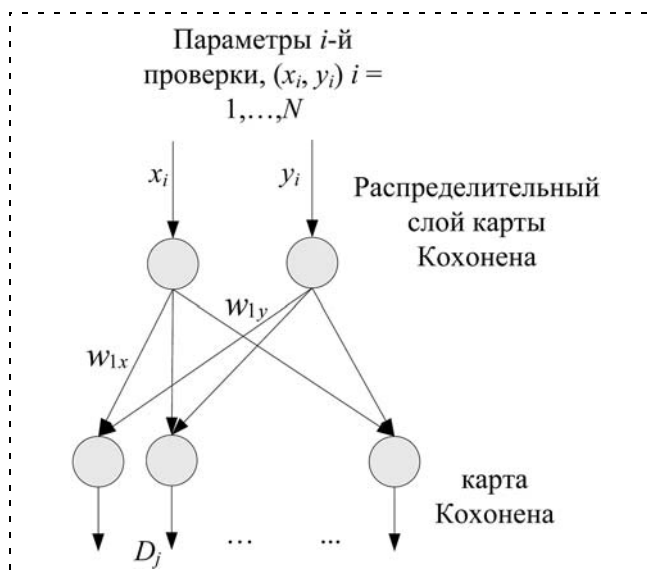


Рис. 1. Топология карты Кохонена для синтеза кратчайшей по времени программы проверок ЭМС

тирует себя так, что плотность весовых векторов приблизительно соответствует плотности распределения параметров проверок ЭМС. Таким образом, после завершения процесса обучения положение проверки в программе должно определиться положением ее образа в кольцевом выходном слое карты Кохонена.

Особенностью описанной нейросетевой модели является использование отображения двумерного распределения проверок ЭМС в пространстве временных параметров на одномерный маршрут их следования.

### Минимизация времени поиска неисправностей ЭМС на основе динамических сетей Хопфилда

Синтез программы поиска неисправностей ЭМС на основе моделей динамических сетей Хопфилда базируется на представлении проверок в пространстве временных координат в виде полносвязного графа и поиске кратчайшего разомкнутого мар-

шрута на данном графе (классическая задача коммивояжера).

Для решения этой задачи в нейросетевом диагностическом базисе с помощью НС Хопфилда маршрут обхода ЭМС или программа проверок ее элементов кодируется активностью нейронов, и подбираются связи между ними, чтобы энергия сети оказалась связанной с полной длиной маршрута.

Исходя из самого способа вычислений динамическими полносвязными сетями естественно утверждать, что данный способ обладает определенной эффективностью при решении размерных и переборных задач. В таких задачах важную роль играет глобальное взаимодействие между выходными сигналами нейронов, интерпретируемых как различные компоненты задачи оптимизации программы проверок при поиске неисправностей ЭМС.

Другими словами, имеем не способ поиска конкретного неисправного блока или узла ЭМС, а способ сокращения временных или других ресурсных издержек при составлении последовательности проверок всех блоков или узлов в целях обнаружения неисправного элемента. Исходными данными для определения вышеупомянутого способа являются:

1. Матрица маршрута проверок, представленная в таблице.

Каждая проверка стоит в определенном месте маршрута обхода ЭМС. В зависимости от положения каждой проверки изменяется ресурс, затрачиваемый на полный обход всех элементов и узлов ЭМС. В качестве ресурса, как правило, выступает время, отводимое на обход всех элементов в целях поиска неисправного узла. При числе проверяемых узлов более 20 перебор различных  $L$  вариантов позиций проверок практически неосуществим обычными методами в традиционной последовательной вычислительной архитектуре, так как  $L = n!$ . Аппаратная реализация модели оптимизирующей полносвязной НС Хопфилда позволяет снять данное ограничение.

2. Структура оптимизирующей полносвязной НС Хопфилда, энергетическая целевая функция которой обусловлена экстремумом при оптимальности маршрута проверок и ограничениями на одинар-

Примерная матрица маршрута проверок ЭМС

Номер проверки в общем маршруте обхода ЭМС	Вид проверки					Измерение параметра вариации амплитуды вибрации
	Проверка асимметрии положения ротора	Проверка параметра износа подшипников	Проверка измерения тока утечки изоляции	...	Термоконтроль сердечника статора	
1	x					
2			x			
...						
$i$		x				
...					...	
$n$						x

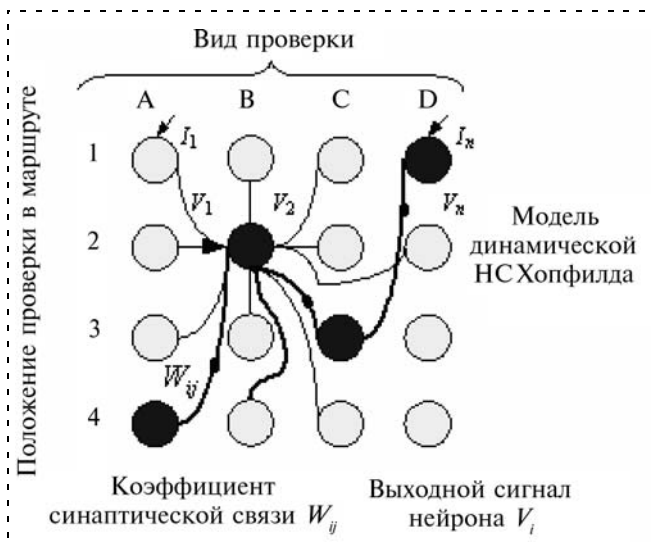


Рис. 2. Структура нейросети для решения задачи поиска оптимального маршрута обхода элементов ЭМС

ность позиций в строках и столбцах. НС Хопфилда содержит  $N = n \times n$  вычислительных элементов, полностью связанных между собой (рис. 2). Предполагаемый маршрут —  $D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ . (Заштрихованным узлом соответствует  $x_i = +1$ , остальным соответствует  $x_i = 0$ .)

Выход каждого  $i$ -го нейрона соединен со входами всех остальных вычислительных элементов с весами  $W_{ij}$ . Для каждого нейрона определим дополнительным входом  $I_i$  смещение вычисленного в теле нейрона внутреннего состояния. Внутреннее состояние  $U_i(t)$  и выход  $V_i(t)$   $i$ -го нейрона определим следующими соотношениями:

$$U_i(t+1) = \sum_{j=1}^N W_{ij}V_j(t) + I_i \text{ и } V_i(t+1) = f(U_i(t+1)),$$

где  $f$  — передаточная функция вычислительного элемента, вычисляемая как

$$V_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{при } \sum_{j=1}^N W_{ij}V_j(t) > I_i; \\ V_j(t), & \text{при } \sum_{j=1}^N W_{ij}V_j(t) = I_i; \\ -1, & \text{при } \sum_{j=1}^N W_{ij}V_j(t) < I_i \end{cases}$$

для  $i = 1, \dots, N$ .

Искомым решением является такая расстановка позиций проверок элементов и узлов ЭМС, при которой в каждой строке матрицы маршрута присутствует только одна проверка, а в каждом столбце — только один номер позиции проверки.

Для получения искомой последовательности проверок НС функционирует по следующему алгоритму:

1. Вычисляются коэффициенты  $W_{ij}$  и  $I_i$  исходя из оптимизируемой квадратичной формы:

$$W_{ij} = -\frac{\partial^2 E}{\partial V_i \partial V_j}, \quad I_i = -\frac{\partial E}{\partial V_i}.$$

2. Инициализируются выходы НС  $V_i(t)$  при  $t = 0$  случайными числами в диапазоне  $[-1, 1]$ . При подаче на вход НС случайного вектора инициализируется свободное взаимодействие нейронов через свои входы — выходы.

3. Вычисляются внутреннее состояние вычислительных элементов  $U_i(t)$  и выход  $V_i(t)$ . При этом на каждом шаге изменяется значение энергетической функции  $E$ :

$$E = \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}V_i(t)V_j(t) - \sum_{i=1}^N V_i(t)I_i \quad (1)$$

В случае, если  $i$ -й нейрон меняет свое состояние, то энергетическая функция получает отрицательное приращение:  $\Delta E = -\Delta V_i U_i - \frac{1}{2} W_{ij} \Delta V_i^2$ , в котором первый член всегда отрицателен, так как передаточная функция — возрастающая.

4. Повторяется шаг 3 до стабилизации выходов нейронов. Если  $W_{ij} > 0$ , то  $E$  убывает, и конечное состояние устойчиво и характеризует искомую последовательность проверок ЭМС.

В случае, когда аппаратная реализация позволяет изменять состояние нейронов одновременно (параллельно),

$$E = - \sum_{i=1}^N \Delta V_i(t) U_i(t) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} V_i(t) V_j(t),$$

где первый член всегда отрицателен, а второй может иметь другой знак. Для гарантированной сходимости к интерпретации оптимальной программы проверок, в данном случае, модифицируем функционал (1) к виду:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} V_i(t) V_j(t+1) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N I_i (V_i(t) + V_j(t+1)).$$

Данный функционал является монотонно убывающим, и НС Хопфилда будет сходиться к устойчивому состоянию. В случае случайного исходного входного воздействия сеть быстро спускается к ближайшему локальному минимуму. Набор выходов  $V_i(t)$  в  $t$ -м состоянии представляет один из возможных маршрутов, интерпретируемых как оптимальная программа поиска неисправностей в ЭМС.

Решение проблемы оптимизации маршрута в пространстве проверок ЭМС на функционале квадратичной формы состоит в формировании соответ-

ствующей нейросетевой архитектуры с соответствующей функционалу энергетической функцией НС. По данной причине задача сформулирована в бинарном виде, и функционирование бинарной сети Хопфилда ограничено вершинами единичного гиперкуба размерности  $N$ . Это указывает на то, что бинарные сети имеют значимую вероятность сходимости к локальному минимуму за малое число циклов. Кроме того, их поведение значительно зависит от начальной инициализации случайными числами, что компенсируется многократным запуском НС на решение и мажоритарным выбором оптимального решения на множестве решений, полученных в ходе запусков.

Таким образом, способ использования модели динамической НС Хопфилда позволяет заменить обучение Хебба прямым заданием указанных весов и порогов для нейросети, а динамика полученной системы будет приводить к уменьшению времени программы обнаружения неисправностей ЭМС. Практическая реализация описанного подхода часто подразумевает добавление вероятностной динамики поведения нейронов (различные вариации метода имитации отжига), так как главная цель — глобальный минимум энергии или наискорейший вариант программы обнаружения неисправностей ЭМС [2, 3].

## Выводы

На основе двух традиционных архитектур НС — карт Кохонена и динамических сетей Хопфилда — представлены нейросетевые модели, позволяющие в едином алгоритмическом базисе диагностической системы реализовать оптимальные по времени программы поиска мест и причин неисправностей электромеханических систем. Выбор той или иной архитектуры НС (Хопфилда или Кохонена), а также правил и параметров итерационных процедур обучения при синтезе программ поиска неисправностей ЭМС зависит от характера исходной обучающей выборки, а также требований по точности и скорости обучения.

## Список литературы

1. **Нейроматематика.** Кн. 6 / Агеев А. Д., Балухто А. Н., Бычков А. В. и др.; Под общ. ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 448 с.
2. **Головко В. А.** Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4. М.: ИПРЖР, 2001. 256 с.
3. **Oohori Takahumi, Mori Toshikatsu, Watanabe Kazuhisa.** Метод порогового контроля для решения задачи коммивояжера с помощью нейронной сети Хопфилда. // Mem. Hokkaido Inst. Techno. 1993. N 21. P. 107—115.

УДК 681.3:622.276

**Э. Н. Алиев**, научн. сотр.

Институт кибернетики  
национальной академии наук Азербайджана,  
Баку, Азербайджан  
aelchin@hotmail.com

## Система мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций в строительстве

*Рассматривается бесконтактный метод мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций в строительстве. Предлагаются способы цифровой обработки акустических сигналов. На основе экспериментальных исследований дается сравнительный анализ результатов обработки сигналов. Предлагается архитектура интеллектуальной системы мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций.*

**Ключевые слова:** техническая диагностика, мониторинг, распознавание, прогноз, несущая конструкция, акустика, ультразвук, диагностические признаки, идентификация

### Введение

Высотные здания относятся к категории объектов города, аварийное состояние которых может вызвать непредсказуемые катастрофические по-

следствия. Поэтому каждое здание должно быть оснащено комплексной системой безопасности. Одним из важнейших элементов этой системы являются меры по предупреждению повреждения несущих конструкций здания. Основными причинами повреждений являются конструктивные ошибки и недоработки, производственные недостатки, нарушения правил эксплуатации и технического обслуживания, некачественный ремонт, естественный износ, снижение усталостной прочности и ряд других причин.

От постоянного или периодического воздействия таких нагрузок в зданиях (сооружениях) могут накапливаться и в некоторый момент времени лавинообразно образовываться сильные, тяжелые и катастрофические разрушения конструктивных элементов [1]. В последнее время этот вопрос становится все более актуальным. Это связано с непосредственной заливкой железобетонных конструкций на строительных площадках, невысоким качеством строительного сырья и материалов, со старением оборудования и т. д. Анализ известных работ и существующих систем (например, Р. Коллакот предлагает логическую модель комплексной оценки качества строительно-монтажных работ, используя показатели надежности возведенных конструкций [2]; А. Клевцов и др. рассматривают методические проблемы повышения сейсмостойкости зданий [3];

В. Гурьев и В. Дорофеев рассматривают пути и технологии устранения наклонившихся зданий на основе уже произошедших аварий [4]; Центр "Гектор" видит решение проблемы в составлении компьютерных программ с базами данных по автоматизации выпуска организационно-технологической документации для строительства [5]; в США и Европе получили известность такие системы управления зданиями, как VACNet, European Installation Bus, технология X10 и др. [6]) показал, что в период эксплуатации зданий основной упор делается на системы, обеспечивающие комфорт. При этом очень мало внимания уделяется вопросу безопасности эксплуатации здания.

В данной работе объектом исследования являются современные жилые здания и их несущие конструкции. Ставится задача разработки интеллектуальной системы мониторинга и диагностики состояния несущих конструкций и оперативное обнаружение и локализация аварийных ситуаций.

### Особенности мониторинга и оценки технического состояния несущих конструкций в строительстве

Наиболее точное представление о состоянии здания дает процедура мониторинга и интерпретации полученных результатов, благодаря которым удается систематизировать и формализовать знания о самом объекте.

На рис. 1 приведена классификация наиболее известных и часто встречающихся причин повреждений несущих конструкций в сооружениях и зданиях.

В настоящее время существующие методы делятся на разрушающий (применяется в предпроектной практике и носит локальный характер) и неразрушающий (применяется в период строительства и эксплуатации). Неразрушающий контроль обеспечивает эффективность контроля, а также своевременность и качество выполнения работ по обслуживанию и ремонту. Это обстоятельство позволяет перейти от субъективных методов оценки

состояния к методам косвенных измерений. На практике к наиболее эффективным методам косвенной оценки относятся акустические методы, например, методы акустической эмиссии и ультразвука. Ультразвуковой импульсный эхо-метод [7], который нами использован в работе, обеспечивает возможность визуализации внутренней структуры неоднородных материалов, к которым относятся бетон и железобетон.

Если на пути ультразвуковых волн от излучателя до приемника нет препятствий, то уровень принятого сигнала максимален и форма сигнала почти неизменна. Однако он резко уменьшается или падает почти до нуля, если на пути ультразвуковой волны встречаются существенные дефекты. В этом случае, естественно, искажается форма сигнала.

Выход приемника ультразвукового преобразователя — это сигналы со случайными задержками и амплитудными множителями. Данные сигналы  $S(t)$  можно представить в следующей параметрической форме:

$$S(t) = f\{A(t), Z(t), K(t)\},$$

где  $A(t)$  — амплитуда сигнала;  $Z(t)$  — временной сдвиг между входным и выходным сигналом ультразвукового преобразователя;  $K(t)$  — гармонический состав сигнала.

Вид зондирующего сигнала можно представить в виде

$$S(t) = \sum_i e^{-yb_i} F(t - b_i)(t - b_i) e^{-a(t - b_i)} \sin[2\pi f(t - b_i)],$$

где  $b_i$  — задержка  $i$ -й составляющей шума;  $y$  — параметр, учитывающий затухание и рассеяние ультразвуковых волн в материале;  $F(t)$  — функция Хевисайда, позволяющая исключить из сигнала любые составляющие со временем задержки, меньшие, чем задержка  $b$  сигнала относительно зондирующего импульса;  $a$  — параметр, определяющий форму огибающей сигнала;  $f$  — частота заполнения;  $t$  — время.

### Статистические методы цифровой обработки сигналов для формирования диагностических признаков

Главной составляющей системы диагностики является математический аппарат обработки и анализа цифровой информации. Для формирования диагностических признаков нами рассмотрен классический метод спектрального анализа (СА) случайных сигналов на основе Фурье-преобразования [8], робастные алгоритмы спектрального анализа (РСА) [9] и метод разложения сигнала на элементарные прямоугольные сигналы, именуемые мультислучайными сигналами (МСС) [10, 11].

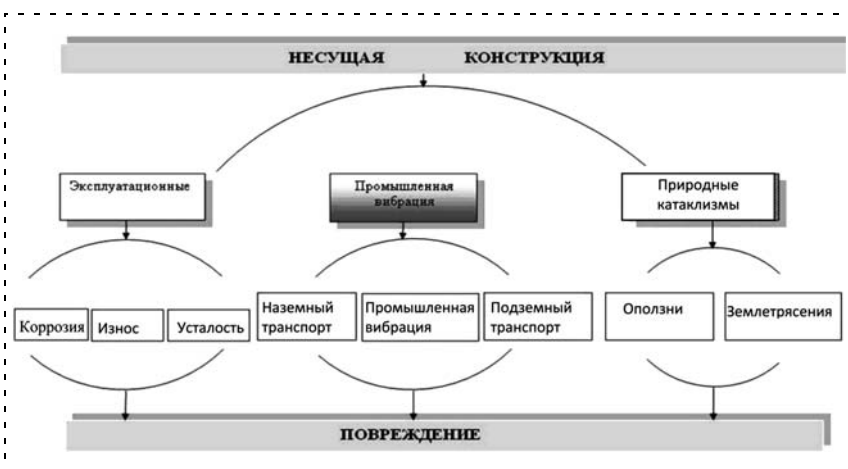


Рис. 1. Классификация основных причин повреждений несущих конструкций



При СА определяются спектральная плотность мощности, спектральная функция, ширина спектра случайного процесса  $S(t)$ , положение и значение максимумов спектральной плотности мощности, граничные частоты и др. Этот метод предусматривает определение гармонических составляющих анализируемого сигнала. Исходный сигнал представляют в виде суммы гармонических функций — синусоид и косинусоид, сумма ординат которых в каждый момент времени  $t$  дает значение анализируемой функции:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)), \quad (1)$$

где  $\frac{a_0}{2}$  — среднее за период  $T$  значение функции  $S(t)$ ;  $a_n, b_n$  — амплитуды синусоиды и косинусоиды с частотой  $n\omega$ .

В (1) при разложении функции  $S(t)$  в тригонометрический ряд Фурье  $\omega$  принимается равной  $\frac{2\pi}{T}$ , а коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  определяются следующим образом:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(n\omega t) dt \text{ при } n = 1, 2, \dots; \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(n\omega t) dt \text{ при } n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Для обеспечения точности описания сигнала требуется выполнение неравенства

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i^2 \leq P, \quad (4)$$

где  $\lambda_i^2$  — квадраты отклонений между суммой правой части равенства (1) и отсчетами сигнала  $S(t)$  в момент дискретизации  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m$  с шагом  $\Delta t$ ;  $P$  — допустимое значение среднеквадратичного отклонения.

Важную роль при этом анализе играют методы статистики, поскольку сигналы, как правило, имеют случайный характер или зашумлены при распространении или измерении [9, 11]. В реальных задачах нередко полезный сигнал сопровождается определенными помехами, и когда эти помехи меняются ощутимо, решение задач с применением спектральных методов затрудняется, так как условие (4) не всегда выполняется. Для практических целей, когда анализируемый сигнал  $S(t)$  состоит из полезного сигнала  $x(t)$  и помехи  $\xi(t)$ , т. е. имеет вид

$$S(t) = x(t) + \xi(t),$$

формула (2) определения коэффициента  $a_n$  ряда Фурье примет вид

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T [S(t)] \cos(2\pi k f) dt = \\ = \frac{2}{T} \int_0^T \{x(t) \cos(2\pi k f) + \xi(t) \cos(2\pi k f)\} dt.$$

Требуемая точность описания отраженного ультразвуковым преобразователем сигнала  $S(t)$  суммой косинусоид и синусоид может оказаться реальной для случаев, когда

$$\sum_{i=1}^{N^+ t_{i+1}} \int_{t_i} \xi(t) \cos(2\pi k f) dt = \sum_{i=1}^{N^- t_{i+2}} \int_{t_{i+1}} \xi(t) \cos(2\pi k f) dt,$$

где  $N^+, t_i, t_{i+1}$  — число, начало и конец положительных полупериодов косинуса, а  $N^-, t_i, t_{i+1}, t_{i+2}$  — число, начало и конец отрицательных полупериодов косинуса за время наблюдения  $T$ .

Во всех остальных случаях, когда это равенство не выполняется, получается разность

$$\lambda_{a_n} = \sum_{i=1}^{N^+ t_{i+1}} \int_{t_i} \xi(t) \cos(n\omega t) dt - \sum_{i=1}^{N^- t_{i+2}} \int_{t_{i+1}} \xi(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (5)$$

что приводит к погрешности в оценке коэффициента  $a_n$ . То же самое также происходит при определении оценки коэффициента  $b_n$ , причем, как видно из выражения (5), с увеличением дисперсии помехи  $\xi(t)$  увеличивается разность  $\lambda_{a_n}$  (соответственно  $\lambda_{b_n}$ ). Отклонение закона распределения анализируемого сигнала  $S(t)$  от нормального, наличие корреляции между полезным сигналом  $x(t)$  и помехой  $\xi(t)$  также приводят к увеличению разности  $\lambda_{a_n}$  и  $\lambda_{b_n}$ . По этим причинам в некоторых случаях погрешности оценок  $\lambda_{a_n}, \lambda_{b_n}$  могут оказаться соизмеримыми с искомыми коэффициентами  $a_n, b_n$ . Для повышения достоверности результатов экспериментальных данных в [9] предложены алгоритмы РСА, позволяющие устранять причины появления погрешностей  $\lambda_{a_n}, \lambda_{b_n}$ . При этом необходимо, чтобы эти алгоритмы были робастными, т. е. позволяли бы устранить связь между величинами  $\lambda_{a_n}, \lambda_{b_n}$  и дисперсией помехи  $\xi(t)$ , чтобы погрешность оценки не зависела от изменения формы закона распределения исследуемого сигнала, коэффициента корреляции между полезным сигналом  $x(t)$  и помехой  $\xi(t)$  и т. д.

Допустим, что время наблюдения  $T$  суммарного сигнала

$$\mathring{s}(t) = \mathring{x}(t) - \mathring{\xi}(t)$$

выбрано достаточно большим. Предполагая, что функция  $\hat{x}(t)$  представляет собой дискретизированный стационарный центрированный случайный сигнал  $\hat{x}(i\Delta t)$  с нормальным законом распределения, а  $\hat{\xi}(t)$  является центрированным случайным сигналом  $\hat{\xi}(i\Delta t)$  с нулевым математическим ожиданием, робастные формулы определения коэффициентов  $a_n$  и  $b_n$  примут вид [9]:

$$a_n^R = \frac{2}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N [\hat{s}(i\Delta t) \cos(n\omega(i\Delta t)) - \lambda_{a_n}^R] \right\};$$

$$b_n^R = \frac{2}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N [\hat{s}(i\Delta t) \sin(n\omega(i\Delta t)) - \lambda_{b_n}^R] \right\}, \quad (6)$$

где  $\hat{s}$  — центрированное значение сигнала  $S(t)$ ;

$$\lambda_a^R = \sum_{i=1}^{N^+} \lambda_{a_n}^+(i\Delta t) - \sum_{i=1}^{N^-} \lambda_{a_n}^-(i\Delta t);$$

$$\lambda_b^R = \sum_{i=1}^{N^+} \lambda_{b_n}^+(i\Delta t) - \sum_{i=1}^{N^-} \lambda_{b_n}^-(i\Delta t).$$

Кроме привычного динамического представления сигналов при анализе и обработке данных широко используется математическое описание сигналов по аргументам, обратным аргументам динамического представления.

Рассмотрим один из вариантов представления сигнала в этой интерпретации. Данный способ получения моделей сигнала заключается в следующем. В процессе аналого-цифрового преобразования (АЦП) непрерывного акустического сигнала происходит его амплитудное квантование, т. е. на каждом шаге  $\Delta t$  преобразования изменяются состояния соответствующих разрядов счетчика отсчетов АЦП. Далее в процессе цифро-аналогового преобразования формируются аналоговые сигналы, сумма которых в моменты дискретизации оказывается равной входному сигналу. Этим самым на соответствующих разрядах счетчика АЦП сигнал разлагается на элементарные сигналы  $q_k(t)$ , принимающие только два значения 1 и 0 с соответствующими весами (амплитудами). В течение цикла  $T$  на соответствующих разрядах АЦП кривая  $S(t)$  с шагом дискретизации  $\Delta t$  разлагается на составляющие  $q_0(t), q_1(t), \dots, q_k(t), \dots, q_l(t)$ , принимающие значение 1 или 0 и имеющие вес соответственно своим позициям:

$$\tilde{S}(t) = \sum_{k=0}^{l-1} q_k(t) =$$

$$= q_{l-1}(t) + q_{l-2}(t) + \dots + q_1(t) + q_0(t),$$

где  $l = \log_2 n$ .

$\tilde{S}(t)$  будем называть МСС случайного процесса  $S(t)$ . Амплитудное значение каждого элементарного сигнала отличается друг от друга и имеет вес  $2^n$ . Поэтому такое значение амплитудно-квантованного сигнала  $\tilde{S}(t)$  в каждый момент времени  $\Delta t$  представляет собой алгебраическую сумму исходного сигнала  $S(t)$  и ошибки округления  $\xi(t)$ .

Частоты изменения каждого  $q_k(t)$  при этом вычисляются по формулам [9]:

$$f_{q_1} = \frac{1}{T} (q_{11}(1 - q_{21}) + q_{12}(1 - q_{31}) + \dots +$$

$$+ q_{1(m-1)}(1 - q_{m1})) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{m-1} q_{1i}(1 - q_{(i+1)1});$$

.....

$$f_{q_n} = \frac{1}{T} (q_{n1}(1 - q_{2n}) + q_{n2}(1 - q_{3n}) + \dots +$$

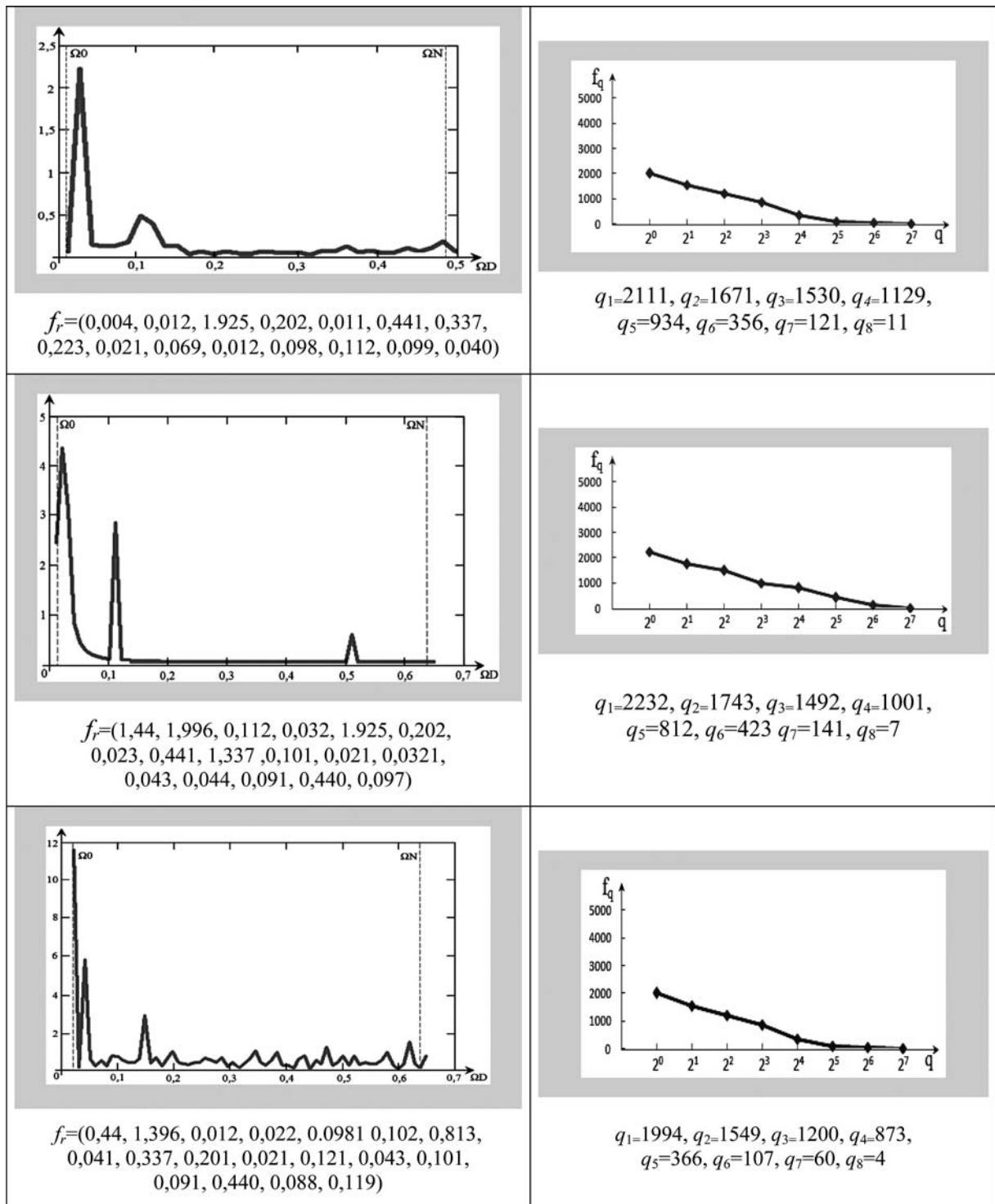
$$+ q_{n(m-1)}(1 - q_{mn})) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{m-1} q_{ni}(1 - q_{(i+1)n}).$$

Если исходный сигнал  $S(t)$  представляет собой случайный процесс, то сигналы  $q_k(t)$  также являются случайными функциями времени. Следовательно, статистические характеристики для  $S(t)$  и для элементарных сигналов  $q_k(t)$  одного того же сигнала не изменятся, если не изменится состояние исследуемого объекта. Выбором шага дискретизации  $\Delta t$  можно обеспечить необходимую чувствительность МСС к изменениям формы кривой, что позволяет при необходимости обнаружить даже небольшие изменения в состоянии объекта и прогнозировать возможность появления тех или иных неисправностей или аварийных ситуаций. Следовательно, при технической диагностике можно успешно использовать статистические характеристики МСС сигналов.

На рис. 2 показаны типичные экспериментальные кривые.

Экспериментальные вычисления позволили сделать следующие выводы:

- ♦ МСС во многих случаях имеет ряд преимуществ; самым главным из них является компактность диагностических признаков, которые задаются нулем или единицей; для хранения не требуется большого объема; многократно уменьшается объем передаваемой информации; улучшается скорость обработки и процесс идентификации состояний;
- ♦ РСА (модель сигнал/шум) показал, что в отличие от классических методов СА и метода МСС спектральный анализ по робастным технологиям позволяет обнаруживать более мелкие изменения параметров сигнала; используя эти характеристики можно достаточно точно представить внутреннее изменение параметров несущих конструкций (микроизменения); при этом самым важным является решение вопросов прогнозирования.



a)

б)

**Рис. 2. Вычислительные эксперименты для создания эталонных кривых в классификационных классах:**  
 а — результаты вычислительных экспериментов по PCA; б — результаты вычислительных экспериментов по MCC

## Особенности реализации системы мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций

Важным отличием современных систем управления зданиями является сочетание "децентрализованных" (распределенных) принципов построения систем с "централизацией" функции мониторинга. Принцип централизации реализован на базе аппаратно-программного ядра комплекса, принцип децентрализации заключается в известной независимости систем, управление которыми построено по схеме распределенных сетей.

На нижнем уровне находятся сенсоры, контроллеры, аппаратные интерфейсы, на верхнем — модуль диагностики и прогнозирования. Все системы комплексов безопасности, жизнеобеспечения, информатизации могут работать автономно или в сети. Система функционирует в контуре обратной связи с жилищным комплексом, ее архитектура сконструирована в виде многомодульной системы.

На рис. 3 представлена структурная схема интеллектуальной системы мониторинга и диагностики состояний несущих конструкций.

В информационной базе данных структура данных кодируется таким образом, чтобы каждый разряд кода отображал число, по которому можно оперативно определить дислокацию несущих конструкций. В модуле формирования признаков происходит обработка исходного сигнала методами РСА и МСС. Структура базы знаний (БЗ) основывается на последовательном анализе и построена продукционным методом: *если* <предпосылки>, *то* <действия>. В БЗ введена следующая условная классификация для состояний несущих конструкций:

- исправное состояние — соответствует требованиям нормы;
- работоспособное состояние — соответствует требованиям текущего ремонта;
- неработоспособное состояние — соответствует требованиям капитального ремонта;
- аварийное предельное состояние — соответствует требованиям полного разрушения.

Формирование БЗ проводится поэтапно, на каждом этапе устраняются ошибки и повторы. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут устранены все противоречия и получены эталонные кривые по методам РСА и МСС для классифицированных состояний.

Для идентификации текущего состояния требуется опрос датчиков (опрос датчиков управляется в двух режимах: обычный режим и режим чрезвычайного положения), накопление измерительной информации (модуль



Рис. 3. Структурная схема интеллектуальной системы

мониторинга), формирование диагностических признаков (модуль формирования признаков). В блоке принятия решений (БПР) происходит сравнение с эталонами, которое реализуется методом дискриминантного анализа. При этом критерием принадлежности истинного признака к эталонному является мера близости [12]. В блоке принятия решений вырабатываются команды управляющих функций.

В программном продукте интеллектуальной системы особое место уделено пользовательскому интерфейсу БПР, который позволяет пользователю задавать вопросы и получать ответы. Вид данного интерфейса приведен на рис. 4. Как видно, здесь

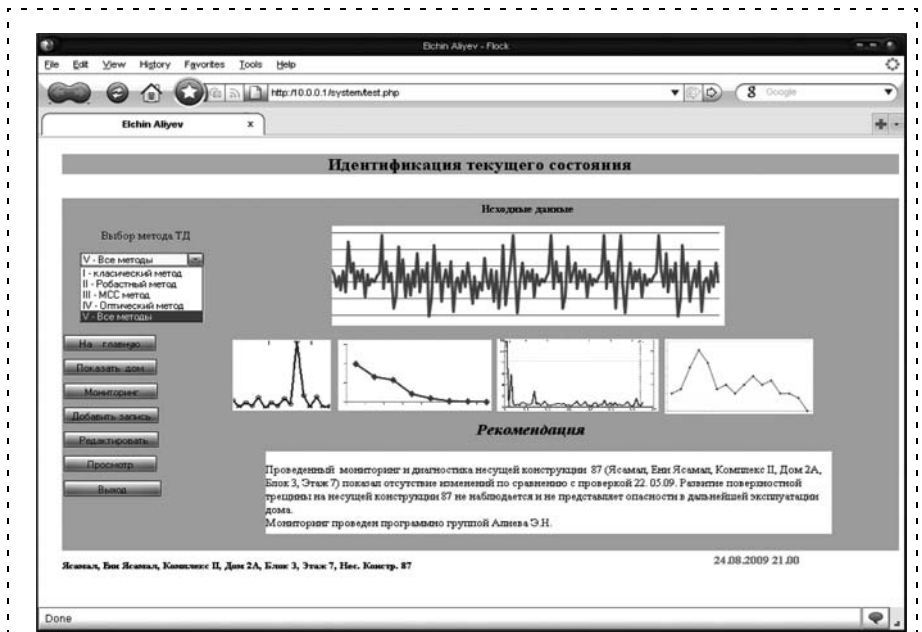


Рис. 4. Интерфейс пользователя



Рис. 5. Формы команд управляющих функций

пользователю дается возможность исследовать выбранный участок любым предложенным методом либо всеми методами параллельно, на основе этого происходит идентификация текущего состояния. Если БПР согласует полученные результаты, система выдает команды управляющих функций (рис. 5) и в окне "Рекомендация" появляется соответствующее решение.

### Заключение

Предлагаемая система в процессе диагностирования несущих конструкций обеспечивает высокую эффективность принимаемых решений за счет максимального использования знаний предметной области и дополнительных знаний, приобретенных в процессе самообучения. Использование больших массивов статистических данных за прошедший период работы позволяет системе проводить аналитические прогнозы и принимать обоснованные стратегические решения. На основе такого анализа

удается оценить степень реального износа зданий, чем обеспечивается надежность и безопасность жилья. Управляющая функция передает команду в соответствующий дом, начиная от простого оповещения в обычной ситуации до команды об отключении дома от энерго-, водо-, газоснабжения вплоть до эвакуации населения в случае чрезвычайной ситуации.

### Список литературы

1. Дорوفеев В. М., Катренко В. Г., Назьмов Н. В. Автоматизированная станция мониторинга технического состояния несущих конструкций высотных зданий // Матер. 2-й междунар. конф.-выставки "Уникальные и специальные технологии в строительстве. UST-Build 2005". 2005. С. 66–67.

2. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М.: Мир. 1988. 516 с.

3. Клевцов В. А., Коревикская М. Г. Об организационно-технических проблемах НК прочности бетона // В мире НК. 2002. № 2 (16). С. 16–17.

4. Гурьев В. В., Доровеев В. М. Контроль устойчивости зданий // Строительство. 2004. № 10. С. 45–46.

5. Ханцеверов В. Ф., Родионов Р. Б. Мониторинг и устранение кренов зданий // Строительные материалы оборудование, технологии XXI века. 2006. № 12 (95). С. 64.

6. Харке В. Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и систем коммуникаций в жилищном строительстве. М.: Техносфера, 2006. С. 288.

7. Балдев Радж, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 576 с.

8. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

9. Telman Aliyev. Rodust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA, 2003. 199 p.

10. Алиев Т. А., Алиев Н. С. Устройство для диагностики стационарных стохастических объектов. А. С. № 1084746, 1983 г.

11. Aliyev N., Aliyev E. Monitoring of steadiness of buildings and construction within a complex system of safety of facilities / Int. Conf. "Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization". Baku-Innsbruck, 2007. P. 559–562.

12. Srivastava M. S. Methods of Multivariate Statistics. Wiley, New York, 2002. 357 p.

## ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)

состоится научно-техническая конференция

### "Искусственный интеллект и управление" (ИИУ-2011)

#### Научные направления конференции:

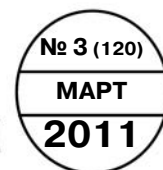
- ◆ Интеллектуальный анализ данных
- ◆ Искусственный интеллект в управлении
- ◆ Системы принятия решений, планирования и моделирования
- ◆ Сетевые модели в искусственном интеллекте
- ◆ Компьютерная обработка естественно-языковых текстов и семантический поиск
- ◆ Автоматизация научных исследований и управление знаниями
- ◆ Обучающие и экспертные системы
- ◆ Прикладные интеллектуальные системы

Подробная информация о мультikonференции МКПУ-2011 условиях участия в ней размещается на сайте: <http://www.mvs.tsure.ru>

# ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



## Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



### Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

### Редакционная коллегия:

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

### Редакция:

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

## СОДЕРЖАНИЕ

- Нагар Ю. Н., Ольшанский В. Ю., Панкратов В. М.**  
Динамика пьезогироскопа при работе в импульсном режиме . . 63
- Колесниченко С. В.**  
Обоснование систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичных летательных аппаратов. . . . . 67
- Кабанов А. А.**  
Система автоматической посадки летательного аппарата корабельного базирования. Часть 2. Подсистема вертикального снижения . . . . . 74

**Ю. Н. Нагар**, ассистент,  
Саратовский государственный  
технический университет,

**В. Ю. Ольшанский**,

д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр.,

**В. М. Панкратов**,

д-р техн. наук, зам. директора по науке,

Институт проблем точной механики

и управления РАН, г. Саратов

iptmuran@san.ru

## Динамика пьезогироскопа при работе в импульсном режиме

*Рассматривается модель пьезогироскопа, состоящего из двух ортогональных пьезопластин и присоединенной к ним массы, в котором действующий на первую пластину переменный ток вызывает в ней упругие волны и колебания присоединенной массы. При переносном вращении устройства кориолисовы силы, действующие на присоединенную массу, создают переменное давление на вторую пластину. Получено, с использованием преобразования Лапласа, решение краевой задачи, описывающей распространение плоских деформационных волн в пьезопластинах. Найдена зависимость амплитуды от времени и определяется время выхода на режим установившихся вынужденных колебаний.*

**Ключевые слова:** сила Кориолиса, пьезоэффект, деформационные волны, преобразование Лапласа

**Постановка задачи.** В настоящее время известен ряд конструкций измерителей угловых скоростей, использующих пьезоэффект (см. например [1]). При этом кориолисовы силы вызывают изгибные деформации в тонких пьезопластинах. Известны работы [2, 3], в которых исследована возможность использования пьезоэффекта в приводах нано- и микроперемещений, когда в пластинах распространяются плоские волны.

В данной статье обсуждается предложенная ранее [4] модель пьезогироскопа, в которой в пьезопластинах возбуждаются только плоские деформационные волны и изгибные деформации отсутствуют.

В рассматриваемой модели действующая на присоединенную массу кориолисова сила оказывает влияние на плоские деформационные волны, возникающие в выполненных из пьезоматериала тонких пластинах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . При этом предполагается, что от груза массы  $M$  на контактирующие с ним пластины толщиной  $\delta_i$ ,  $i = 1, 2$ , и площадью  $A$  передаются только нормальные усилия (рис. 1).

К одной из пластин ( $\Pi_1$ ) прикреплены электроды, с помощью которых подается электрический сигнал. Направление оси поляризации пьезоматериала, оси сигнала и направление механического напряжения совпадают, т. е. в пластине имеет место продольный пьезоэффект. Порождаемые в пьезопластинке плоские упругие деформационные волны приводят в движение груз.

При вращении подвижной системы отсчета относительно инерциальной системы возникает кориолисова сила инерции, действующая на груз. Угловая скорость  $\Omega$  подвижной системы отсчета влияет на амплитуду и другие характеристики колебаний.

В работе [4] изучен случай, когда рассеивание энергии внутри пластин пренебрежимо мало и найдены собственные частоты устройства. В данной статье используется математическая модель, в которой коэффициент затухания, учитывающий рассеивание энергии, отличен от нуля. Для увеличения амплитуды колебаний и, соответственно, чувствительности устройства частота возбуждаемых вынужденных колебаний должна быть близка к одной из собственных частот, которые оказываются [4] достаточно большими ( $\geq 2$  МГц). При работе в непрерывном режиме это может привести к быстрому нагреву пьезопластин и существенному изменению их характеристик [5]. Одним из альтернативных вариантов является работа в импульсном режиме, когда короткие периоды возбуждения колебаний чередуются с длинными паузами. Так как для надежного измерения угловой скорости длительность активной фазы должна быть значительно больше времени переходного процесса, то возникает необходимость анализа возникающего переходного процесса.

Ниже с использованием преобразования Лапласа получено решение краевой задачи, описывающей распространение плоских деформационных волн в пьезопластинах. Найдена зависимость амплитуды от времени и определяется время выхода на режим установившихся вынужденных колебаний.

**Построение математической модели.** Обозначим  $u_i(x_i, t)$  — перемещение плоского слоя с координатой  $x_i$  в пластине  $\Pi_i$  ( $i = 1, 2$  — номера пластин). Воспользуемся волновым уравнением, описывающим распространение волны в длинной линии с затуханием без искажений [5, 6]:

$$\frac{1}{(c^E)^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \alpha^2 \xi_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент затухания, учитывающий рассеивание энергии,  $c^E$  — скорость звука в пьезокерамической пластине при  $E = \text{const}$ .

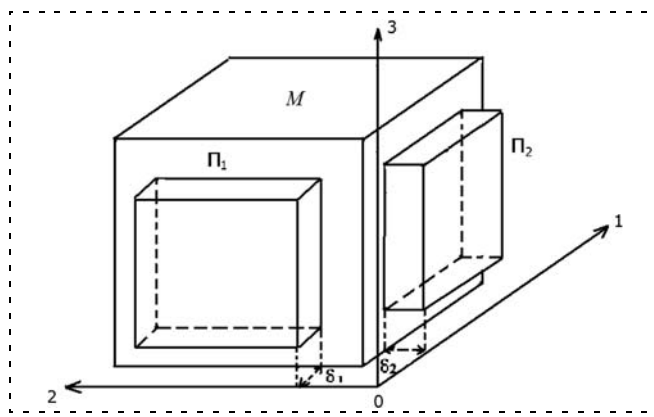


Рис. 1. Конструктивная схема пьезогироскопа

Зададим начальные условия

$$u_i(x_i, 0) = 0; \left. \frac{\partial u_i}{\partial t} \right|_{t=0} = 0; i = 1, 2. \quad (2)$$

Дополним их граничными условиями, учитывая закрепление пластин:

$$u_i(0, t) = 0, i = 1, 2, \quad (3)$$

и условиями равновесия на поверхностях пластин, контактирующих с присоединенным грузом:

$$\sigma_x A = -M \frac{\partial^2 u_i(\delta_i, t)}{\partial t^2} + F_i^c, i = 1, 2, \quad (4)$$

где  $F_1^c = 2M\Omega_3 \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial t}$ ,  $F_2^c = -2M\Omega_3 \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial t}$  — кориолисовы силы инерции, возникающие за счет компонента  $\Omega_3$  угловой скорости.

Связь относительной деформации  $\partial u_i / \partial x_i$  по толщине пластины  $P_i$  с механическим напряжением  $\sigma_x$  и напряженностью электрического поля  $E_i$  дается линейными уравнениями пьезоэффекта [6]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = d_{33}^E E_i + s_{33}^E \sigma_x, \quad (5)$$

где  $d_{33}^E$  — пьезомодуль при продольном пьезоэффекте;  $s_{33}^E$  — упругие податливости по осям  $i = 1, 2$  при  $E = \text{const}$ ;  $E_i(t) = U_i / \delta_i$ ,  $x_i \in [0, \delta_i]$ .

Подставляя выражения (4) в условия (5), получим граничные условия

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u_1(x_1, t)}{\partial x_1} \right|_{x_1 = \delta_1} &= d_{33}^E E_1(t) + \\ &+ \frac{s_{33}^E}{A} \left[ -m \frac{\partial^2 u_1(\delta_1, t)}{\partial t^2} + 2m\Omega_3 \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial t} \right]; \\ \left. \frac{\partial u_2(x_2, t)}{\partial x_2} \right|_{x_2 = \delta_2} &= d_{33}^E E_2(t) + \\ &+ \frac{s_{33}^E}{A} \left[ -m \frac{\partial^2 u_2(\delta_2, t)}{\partial t^2} - 2m\Omega_3 \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial t} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, краевая задача для определения перемещений в пластинах включает уравнения (1), начальные условия (2) и граничные условия (3), (6).

Так как период колебаний пластин весьма мал, возможно рассматривать установившиеся колебания при  $\Omega_3 = \text{const}$ . Перейдем к безразмерным переменным  $x_i = x_i^{\text{разм}} / \delta_i$ ,  $u_i = u_i^{\text{разм}} / \delta_i$ ,  $i = 1, 2$ ;  $t = t^{\text{разм}} c^E / \delta_1$ . Пусть  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ . Обозначим  $\varepsilon = 2\Omega_3 \delta_1 / c^E$ ,  $\kappa = M(c^E)^2 s_{33}^E / \delta_1 A$ ,  $h_i = d_{33}^E E_i(t)$ . Заметим, что параметр  $\varepsilon$  оказывается малым. Например, при

$\delta_1 = 6 \cdot 10^{-4}$  м,  $c^E = 3,6 \cdot 10^3$  м/с,  $\Omega_3 = 100$  рад/с получим  $\varepsilon = 3,3 \cdot 10^{-5}$ .

Уравнения (1) и условия (6) примут вид

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + 2\alpha\delta \frac{\partial u_i}{\partial t} + \alpha^2 \delta^2 u_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}, i = 1, 2; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u_1(x_1, t)}{\partial x_1} \right|_{x_1 = 1} &= \\ &= h_1(t) + \kappa \left[ -\frac{\partial^2 u_1(1, t)}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial u_2(1, t)}{\partial t} \right]; \\ \left. \frac{\partial u_2(x_2, t)}{\partial x_2} \right|_{x_2 = 1} &= \\ &= h_2(t) + \kappa \left[ -\frac{\partial^2 u_2(1, t)}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial u_1(1, t)}{\partial t} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Условия (2), (3) останутся без изменений.

**Расчет динамики пьезопластин.** Представим решение в виде разложения  $u_i(x_i, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_{in}(x_i, t) \varepsilon^n$ ,

$i = 1, 2$ , по малому параметру  $\varepsilon \ll 1$ . Подставим эти ряды в уравнения (7), начальные условия (2), граничные условия (3) и (8). В результате для  $u_{i0}$  получим несвязанные краевые задачи, включающие уравнения (7), условия (2), (3) и условия

$$\left( \frac{\partial u_{i0}(x_i, t)}{\partial x_i} + \kappa \frac{\partial^2 u_{i0}(x_i, t)}{\partial t^2} \right) \Big|_{x_i = 1} = h_i(t), i = 1, 2.$$

Для  $u_{i1}$  краевые задачи связаны и включают уравнения (7), условия (2), (3) и условия

$$\left( \frac{\partial u_{11}(x_1, t)}{\partial x_1} + \kappa \frac{\partial^2 u_{11}(x_1, t)}{\partial t^2} \right) \Big|_{x_1 = 1} = \kappa \frac{\partial u_{20}(x_2, t)}{\partial t} \Big|_{x_2 = 1};$$

$$\left( \frac{\partial u_{21}(x_2, t)}{\partial x_2} + \kappa \frac{\partial^2 u_{21}(x_2, t)}{\partial t^2} \right) \Big|_{x_2 = 1} = -\kappa \frac{\partial u_{10}(x_1, t)}{\partial t} \Big|_{x_1 = 1}.$$

Положим  $h_2(t) = 0$ . Применив к этим задачам преобразование Лапласа по переменной  $t$ , получим соответственно

$$\frac{d^2 \tilde{u}_{10}}{dx_1^2} - \gamma^2 \tilde{u}_{10} = 0; \quad (9)$$

$$\tilde{u}_{10} \Big|_{x_1 = 0} = 0, \left( \frac{d\tilde{u}_{10}}{dx_1} + \kappa p^2 \tilde{u}_{10} \right) \Big|_{x_1 = 1} = \tilde{h}_1 \quad (10)$$



и

$$\frac{d^2 \tilde{u}_{21}}{dx_2^2} - \gamma^2 \tilde{u}_{21} = 0; \quad (11)$$

$$\tilde{u}_{21}|_{x_2=0} = 0, \left( \frac{d\tilde{u}_{21}}{dx_2} + \kappa p^2 \tilde{u}_{21} \right) \Big|_{x_2=1} = \tilde{h}_3. \quad (12)$$

Здесь  $\tilde{u}_{10}(p) = L\{u_{10}(t)\}$ ,  $\tilde{h}_1(p) = L\{h_1(t)\}$ ,  $\tilde{u}_{21}(p) = L\{u_{21}(t)\}$  — преобразования Лапласа соответствующих функций,  $\gamma = p + \alpha\delta$ ,

$$\tilde{h}_3(p) = L\left\{ -\kappa \frac{\partial u_{10}}{\partial t} \Big|_{x_1=1} \right\} = -\kappa(p\tilde{u}_{10}(p) - u_{10}(1, 0)). \quad (13)$$

Решением уравнения (9), удовлетворяющим граничным условиям (10), является функция  $\tilde{u}_{10} = \frac{\text{sh}(\gamma x_1)}{\gamma \text{ch}\gamma + \kappa p^2 \text{sh}\gamma} \tilde{h}_1$ . Оригинал этого изображения при  $x_1 = 1$  находим, используя теорему умножения [7]:

$$u_{10}(1, t) = L^{-1}\{\varphi(p)\tilde{h}_1\} = \int_0^t \Phi(\tau)h_1(t - \tau)d\tau. \quad (14)$$

Здесь  $\varphi(p) = \frac{1}{f(p)}$ ,  $f(p) = \gamma \text{ch}\gamma + \kappa p^2$ ,  $\Phi(t) = L^{-1}\{\varphi(p)\}$ .

Согласно второй теореме разложения [7] получаем

$$\Phi(t) = 2\text{Re} \sum_{p_n: \text{Im} p_n > 0} \frac{e^{p_n t}}{f'(p_n)}, \quad (15)$$

где  $p_n = \gamma_n - \alpha\delta$  — простые полюсы функции  $\varphi(p)$ . Для нахождения этих полюсов потребовалось решить уравнение в комплексных переменных  $\text{sth}\gamma = -\kappa(\gamma - \alpha\delta)^2/\gamma$ . Обозначив  $\gamma = x + iy$  и выделив действительную и мнимую части, приходим к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\text{sh}(2x)}{\text{ch}(2x) - \cos(2y)} = -\kappa \left( x - \beta + \frac{\beta^2 x}{x^2 + y^2} \right); \\ \frac{\sin(2x)}{\text{ch}(2x) - \cos(2y)} = \kappa \left( y - \frac{\beta^2 y}{x^2 + y^2} \right). \end{cases} \quad (16)$$

Была получена асимптотическая оценка решения системы (16) вида

$$x_n = \frac{2\beta}{\kappa l \frac{2}{n^2}}, y_n = \pi n + \frac{1}{\kappa \pi n}, n \gg 1.$$

При малых значениях  $n$  решение системы находили методом продолжения по параметру  $\alpha$ , где в качестве начальных приближений для  $y_n$  брали значения собственных частот пластин, рассчитанные в [4], а для  $x_n$  — нулевые значения.

Положим  $h_1(t) = U_0 \sin(\beta t)$ . В этом случае равенство (14) с учетом (15) примет вид

$$u_{10}(1, t) = 2U_0 \text{Re} \sum_{p_n: \text{Im} p_n > 0} \frac{\beta(e^{p_n t} - \cos(\beta t)) - p_n \sin(\beta t)}{(\beta^2 + p_n^2)f'(p_n)}. \quad (17)$$

Подставляя функцию  $\tilde{u}_{10}$  при  $x_1 = 1$  в равенство (13), получим

$$\tilde{h}_3 = -\kappa p \frac{\tilde{h}_1}{\gamma \text{th}\gamma + \kappa p^2}. \quad (18)$$

Решение уравнения (11), удовлетворяющее граничным условиям (12) с учетом равенства (18), имеет вид

$$\tilde{u}_{21} = -\frac{\text{sh}(\gamma x_2)}{\gamma \text{ch}\gamma + \kappa p^2 \text{sh}\gamma} \cdot \frac{\kappa p \tilde{h}_1}{\gamma \text{th}\gamma + \kappa p^2}. \quad (19)$$

Восстановив оригинал функции (19) при  $x_2 = 1$ , находим

$$u_{21}(1, t) = -\kappa U_0 \beta \sum_{p_n} \frac{1}{f'^2(p_n)} \times \left( \frac{p_n \left( t - \frac{f''(p_n)}{f'(p_n)} \right) e^{p_n t} + \frac{f''(p_n)}{f'(p_n)} (p_n \cos(\beta t) - \beta \sin(\beta t))}{(\beta^2 + p_n^2)} + \frac{(p_n^2 - \beta^2)(\cos(\beta t) - 2\beta p_n \sin(\beta t))}{(\beta^2 + p_n^2)^2} \right). \quad (20)$$

Пренебрегая слагаемыми более высокого порядка малости, перемещение незакрепленной грани пластины  $\Pi_2$  можно выразить следующим образом:

$$u_2(\delta_2, t) = \delta_2 \varepsilon u_{21}(1, t). \quad (21)$$

Введем в рассмотрение функцию  $u = u_1 + iu_2$ , которая удовлетворяет уравнению (7), условиям (2), (3), а также условию

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=1} = h(t) - \kappa \frac{\partial^2 u(1, t)}{\partial t^2} - \kappa \varepsilon i \frac{\partial u(1, t)}{\partial t}, \quad \text{где } h(t) = h_1(t) + ih_2(t). \quad (22)$$

Будем искать вынужденные колебания, т. е. исключим из задачи начальные условия (2). В случае, когда  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  — гармонические функции, можно записать  $h = q_1 e^{i\beta t} + q_2 e^{-i\beta t}$ . Полагая  $h_i(t) = U_0 \sin(\beta t)$ ,  $h_2(t) = 0$ , получим  $q_1 = -\frac{U_0}{2} i$ ,  $q_2 = \frac{U_0}{2} i$ .

Искомое решение можно теперь представить в виде  $u = q_1 u^{(1)} + q_2 u^{(2)}$ , где  $u^{(1)} = \varphi_1(x)e^{i\beta t}$ ,  $u^{(2)} = \varphi_2(x)e^{-i\beta t}$ . Подставив частные решения  $u^{(1)}$ ,  $u^{(2)}$  в уравнение (7), получим следующие уравнения для определения  $\varphi_1(x)$  и  $\varphi_2(x)$ :

$$\varphi_i''(x) = \lambda_i^2 \varphi_i(x), \quad i = 1, 2, \quad (23)$$

где  $\lambda_{1,2} = \alpha\delta \pm i\beta$ .

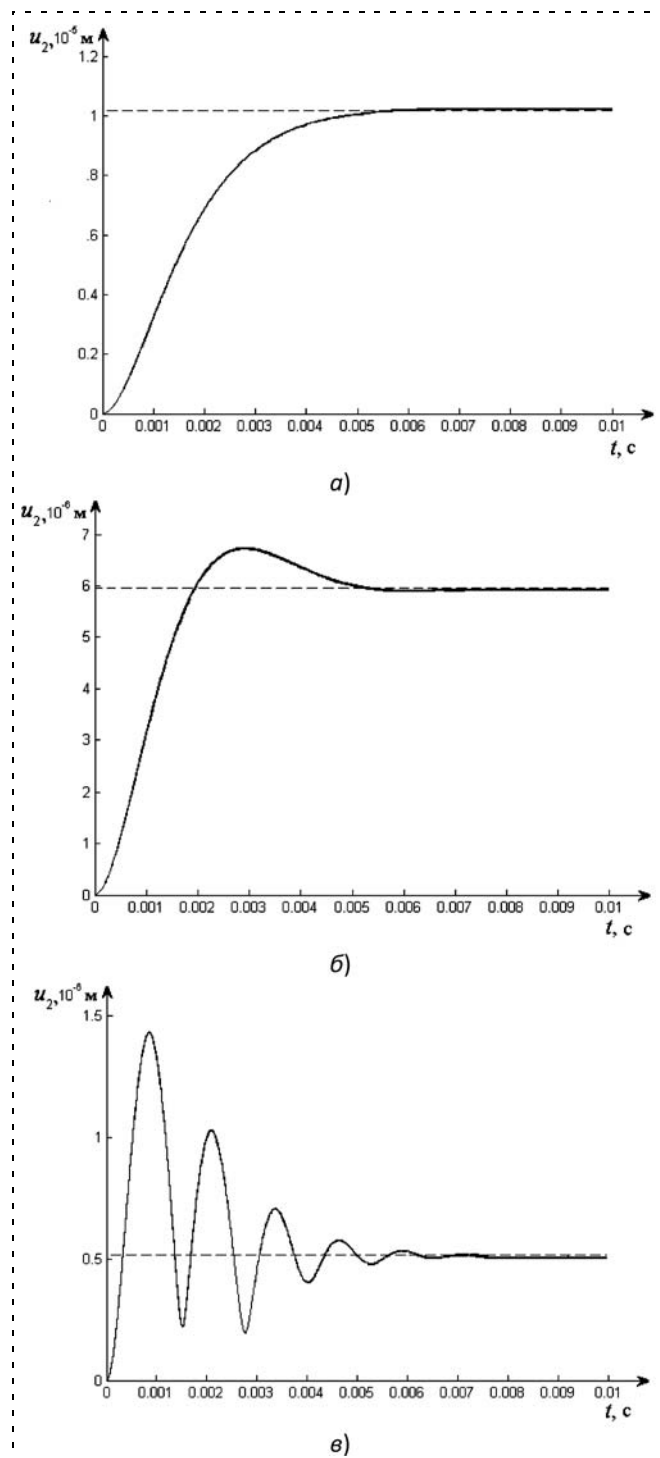


Рис. 2. Амплитудные значения перемещений во второй пластине для переходного процесса:  
 а —  $\beta = 2,77984$  МГц, б —  $\beta = 2,779$  МГц, в —  $\beta = 2,775$  МГц

Решения уравнений (23), удовлетворяющие граничному условию (3), имеют вид  $\varphi_i(t) = r_i \text{sh}(\lambda_i x)$ . Константы  $r_1, r_2$  определяются из граничных условий (22):

$$r_1 = [\lambda_1 \text{ch} \lambda_1 - \kappa \beta \text{sh} \lambda_1 (\beta + \varepsilon)]^{-1},$$

$$r_2 = [\lambda_2 \text{ch} \lambda_2 - \kappa \beta \text{sh} \lambda_2 (\beta - \varepsilon)]^{-1}.$$

Таким образом, приходим к следующей формуле, задающей вынужденные колебания:

$$u = q_1 r_1 \text{sh}(\lambda_1 x) e^{i\beta t} + q_2 r_2 \text{sh}(\lambda_2 x) e^{-i\beta t}. \quad (24)$$

Перемещения в пластинах определяются следующим образом:  $u_1 = \text{Re} u$ ,  $u_2 = \text{Im} u$ .

По формуле (24) была получена зависимость амплитуды колебаний контактирующей с присоединенной массой поверхности пластины  $P_2$  от частоты вынуждающих колебаний. Это позволило определить несколько резонансных частот внешнего воздействия и соответствующие им амплитуды, которые приведены в таблице. Количественные результаты были получены для пластин, изготовленных из пьезокерамики марки ЦТС-19. Полученные значения частот близки к собственным частотам пластин, рассчитанным в [1].

Резонансные частоты и соответствующие амплитуды

$\beta$ , МГц	2,779986	19,281446	37,919705	56,697370
$u_{2\text{max}}$ , М	$1,035 \cdot 10^{-5}$	$1,979 \cdot 10^{-11}$	$6,606 \cdot 10^{-13}$	$8,897 \cdot 10^{-14}$

**Анализ переходного процесса.** Для переходного процесса были проведены численные расчеты по формулам (20), (21) при частоте внешнего воздействия, близкой к резонансной, и построен график зависимости амплитудных значений перемещения  $u_2(\delta_2, t)$ . Определен промежуток времени, за который происходит выход на установившиеся колебания, он составил  $\Delta t \approx 0,007$  с.

На рис. 2 представлено сравнение амплитудных значений перемещения для переходного процесса (сплошная линия) и вынужденных колебаний (штриховая линия) при различных значениях частоты внешнего воздействия.

#### Список литературы

1. Распов В. Я. Микромеханические приборы. Тула: Изд-во Тульского гос. ун-та, 2002.
2. Афонин С. М. Параметрическая структурная схема пьезопреобразователя // Известия РАН // Механика твердого тела. 2002. № 6. С. 101–107.
3. Афонин С. М. Обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого преобразователя для систем управления нано- и микроперемещениями // Известия РАН. Теория и системы управления, 2007. № 2.
4. Нагар Ю. Н., Ольшанский В. Ю., Панкратов В. М., Серебряков А. В. Об одной модели пьезогироскопа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 71–74.
5. Окадзак К. Технология керамических диэлектриков. М.: Энергия, 1976.
6. Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Электроупругость. Киев: Наук. думка, 1989.
7. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973.

**С. В. Колесниченко**, канд. техн. наук, доц.  
Михайловская военная артиллерийская академия  
serjkor@yandex.ru

## Обоснование систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичных летательных аппаратов

*Изложены некоторые проблемные вопросы обоснования и разработки систем высокоточного навигационно-временного обеспечения высокодинамичных летательных аппаратов. Предлагается ряд концептуальных, схемных, технических и конструктивных решений по расширению возможностей систем управления летательных аппаратов за счет использования параметров альтернативных навигационных систем.*

**Ключевые слова:** система управления, комплексирование, альтернативные навигационные системы, выставка бортовой аппаратуры, точность определения параметров, эффективность

### Введение

Значительные изменения в международной обстановке, произошедшие за последние 20 лет, характеризуются нарастанием числа локальных войн и конфликтов различной степени интенсивности как в непосредственной близости от рубежей Российской Федерации, так и на ее территории. Тенденции развития средств и систем наступательного и оборонительного оружия США, стран НАТО и ряда государств "третьего" мира свидетельствуют о формировании в перспективе качественно нового этапа военного противостояния.

Переход от концепции ядерного противостояния к возможности крупномасштабного ведения боевых действий обычными средствами стимулировал усиленную разработку новых эффективных видов оружия. В настоящее время наблюдается нарастающая тенденция к увеличению доли сил и средств противоборствующих сторон, отнесенных к высокоточному оружию (ВТО), применение которого весьма существенным образом влияет на тактику и стратегию ведения боевых действий.

В основу военного строительства Вооруженных Сил (ВС) Российской Федерации положен принцип оборонной достаточности, при котором осуществляется ориентация на качественные параметры вооружения и поддержание военного равновесия на минимальном уровне, исключающем возможность внезапного нападения при обеспечении гарантированного отражения любой агрессии. Военно-технические принципы строительства ВС предполагают приоритетное развитие высокоточных средств вооруженной борьбы различного назначе-

ния в неядерном оснащении. Среди них значительная доля отводится ракетно-артиллерийскому вооружению (РАВ).

В свою очередь, проблема комплексного повышения боевой эффективности РАВ является весьма сложной и многосторонней. Важное место занимает задача повышения точности попадания средств поражения в цель. Улучшение точностных характеристик долгие годы осуществлялось по сходным принципам и направлениям. К сожалению, экономические трудности, жесткие требования к эксплуатационным характеристикам, ограниченные сроки разработки и внедрения новых образцов РАВ на определенном этапе (в 90-х гг.) привели к значительному сворачиванию работ в области традиционных технологий. В первую очередь, это относится к исследованиям в области создания прецизионных гироскопических и оптико-механических систем с улучшенными характеристиками. Разработка последних требует больших временных, экономических и интеллектуальных затрат, что в настоящее время трудно осуществить практически, учитывая реальное положение в отраслях оборонной промышленности. Как следствие, все большее внимание уделяется новым способам уменьшения промахов средств поражения.

Опыт ведущих учреждений и предприятий РФ по разработке перспективного РАВ показывает, что в настоящий момент весьма эффективной возможностью наращивания его боевых характеристик является успешное решение задачи внедрения современного навигационно-временного обеспечения (НВО) предстартовой подготовки, пуска и полета ракет и реактивных снарядов. Так, например, создание комплексированных систем управления (КСУ) с коррекцией параметров движения на траектории с помощью информации, получаемой от космических навигационных систем, позволило бы уменьшить промахи ряда перспективных ракет на 100...150 м. Кроме того, сохраняющееся превалирование ракет с системами управления, построенными по классическим принципам инерциальной навигации, а также развитие их в обозримом будущем в рамках модернизации штатного вооружения предполагает снижение ошибок топогеодезической подготовки пусков ракет и целеуказания, что в значительной степени связано с созданием качественного НВО.

И, наконец, переход в перспективе (2010—2020 гг.) к преимущественному применению самонаводящихся на конечном участке траектории ракет и реактивных снарядов, а также их боевых частей, блоков и элементов не исключает, а наоборот, предполагает создание соответствующего современного НВО, без которого эффективное решение задач прицеливания и наведения невозможно.

Несмотря на значительное число работ в данной области прямой перенос полученных результатов на разработку НВО для высокоточного РАВ крайне затруднителен.

Объясняется это существенной спецификой средств поражения РАВ как объектов управления, особенностями боевого применения ракетных войск и артиллерии, нарастающими требованиями к надежному (гарантированному) поражению точечных целей в изменяющихся условиях реального времени, а также рядом других факторов. Особое место среди них занимает концептуальный фактор, поскольку до сих пор несколько размыта и неопределена тенденция развития ВТО. Несмотря на относительную бесперспективность инерциальных систем наведения, последние доминируют в ракетных образцах РАВ. Предполагается их широкое использование и впредь. В то же время до настоящего времени не удалось разработать достаточно эффективные самонаводящиеся средства поражения оперативно-тактического и тактического радиусов действия, не говоря уже об интеллектуальных системах. Как следствие, проработка перспективных вариантов ракет (в частности вариантов комплексированных систем управления) неминуемо приводит к проблеме поиска совокупности оптимальных компоновочных и параметрических решений исходя из критерия "эффективность—стоимость".

Таким образом, перечисленные факторы свидетельствуют о наличии ряда противоречий, требующих разрешения при совершенствовании существующих и разработке перспективных систем управления образцов ВТО.

Первое противоречие обусловлено необходимостью разработки новейших видов вооружений, в том числе и ракетных комплексов (РК), в условиях противостояния с зарубежными государствами, создающими все более эффективные боевые системы, и отсутствием экономических, временных, материальных и интеллектуальных возможностей на проведение многочисленных НИОКР.

Второе противоречие связано с недостаточной эффективностью разработок, направленных на улучшение характеристик отдельных элементов и подсистем высокоточных ракет (ВТР) и РК, поскольку часто это приводит к незначительному повышению их технического уровня при несоизмеримых затратах.

Третье противоречие обусловлено важностью учета особенностей боевого применения ракетного вооружения при разработке соответствующих образцов и, в том числе, требования обеспечения высокоточного наведения на поражаемые объекты в изменяющихся условиях реального времени. Это приводит к необходимости вести разработку методов, способов и алгоритмов навигационно-временного обеспечения, которые позволяли бы минимизировать доминирующие в промахх ракет и реактивных снарядов инструментальные ошибки, ошибки топогеодезической подготовки, а также ошибки, обусловленные маневрами цели, изменениями "важности" составляющих групповых целей (с задачей перенацеливания в полете) при малом

(в пределах десятков секунд, единиц минут) времени на осуществление процесса наведения ракет (боевых частей, боевых элементов).

Четвертое противоречие связано с необходимостью разработки для перспективных ВТР систем автоматического управления (САУ) с улучшенными точностными характеристиками и ограниченными возможностями создания прецизионных инерциальных систем низкой стоимости. Отсюда следует важнейшая задача разработки более эффективных бортовых и наземных навигационных систем (комплексов) образцов РАВ.

Пятое противоречие связано с относительной бессистемностью исследований в области создания образцов вооружения для различных видов ВС и родов войск и, как следствие, с отсутствием методологии разработки и применения систем высокоточного навигационно-временного обеспечения формирования и группировок ракетных войск и артиллерии. В связи с этим представляется необходимой проработка военно-экономического обоснования прогнозирования и создания навигационно-временного обеспечения перспективного РАВ.

Таким образом, можно отметить, что наличие множества отдельных (порой весьма удачных) частных решений в области навигационно-временного обеспечения существующих ракетных комплексов не снимает задачу глубокой комплексной проработки соответствующих вопросов исходя из концепции развития высокоточных ракет, накопленного инженерно-конструкторского и боевого опыта, с учетом реального состояния промышленности и ВС РФ. Следовательно, имеется острая необходимость создания методологических основ навигационно-временного обеспечения перспективного РАВ, использование которых может составить базу для построения соответствующих образцов в ближайшие годы.

Основными положениями методологии навигационно-временного обеспечения перспективных образцов РАВ являются следующие:

- оценка возможностей существующих и перспективных систем, создающих навигационное поле;
- оценка возможностей и обоснование требований приемной аппаратуры потребителей;
- исследование существующих и перспективных методов управления и наведения высокоскоростных маневренных летательных аппаратов;
- исследование проблем структурной и функциональной реконфигурации бортовых систем управления;
- разработка новых и развитие существующих методов обработки параметров навигационной информации;
- обоснование схемных, технических и конструктивных решений систем и методов управления и наведения образцов РАВ, а также их отдельных элементов.

## Системы навигации высокодинамичных летательных аппаратов

В настоящее время как отечественными, так и зарубежными разработчиками большое внимание уделяется вопросам развития и совершенствования систем управления летательных аппаратов (ЛА). В первую очередь, это относится к исследованиям в области создания прецизионных гироскопических и оптико-механических систем с улучшенными характеристиками [1]. Разработка последних требует больших временных, экономических и интеллектуальных затрат, что в настоящее время трудно осуществить практически, учитывая реальное экономическое положение в отраслях оборонной промышленности. Как следствие, при разработке перспективных навигационных систем все большее внимание уделяется новым способам уменьшения промахов средств поражения на основе комплексирования традиционных инерциальных навигационных систем с системами навигации, основанными на других физических принципах. Так, в связи с неоднократным успешным применением существующих сетевых спутниковых радионавигационных систем (ССРНС) и широким развитием их аппаратуры потребителей имеется реальная возможность создания альтернативных высокоточных навигационных систем ЛА [2, 5]. Исходя из анализа технических характеристик при построении комплексированных систем могут использоваться следующие навигационные системы (НС):

- инерциальные (ИНС) — как классические, так и бесплатформенные (БИНС);
- спутниковые системы (СНС);
- радионавигационные (оптико-электронные НС);
- корреляционно-экстремальные (КЭНС);
- магнитометрические (магниторезонансные) НС.

С учетом анализа характеристик и реальных возможностей технической реализации наиболее приемлемыми в настоящее время являются следующие варианты комплексирования бортовых систем управления:

- ИНС (БИНС) + СНС;
- ИНС (БИНС) + КЭНС;
- ИНС (БИНС) + СНС + КЭНС.

Другим, заслуживающим внимания, направлением развития систем и методов навигации высокоскоростных маневренных летательных аппаратов является использование методов относительной навигации. В связи с этим представляет интерес использование радионавигационных систем, особенно при разработке систем конечного наведения головных частей или отдельных боевых элементов.

В известных разностно-дальномерных системах навигации (определения координат местоположения потребителя информации) реализованы фазовые методы, при использовании которых может быть получен требуемый темп измерений [5, 6]. При этом система (рис. 1) содержит опорную станцию (ОС) и несколько ведомых (ВС). На опорной

и ведомых станциях имеются эталонные генераторы, которые синхронизируют передатчики. В аппаратуре потребителя (П) информации принятые сигналы после усиления подаются на коммутатор, работающий синхронно с переключениями опорной и ведомых станций. В структуре потребителя имеется опорный генератор, который совместно с измерителями фаз обеспечивает измерение разности фаз сигналов от опорной станции и от ведомой станции. По разности фаз сигналов от опорной и ведомой станций находится разность дальностей между ними и потребителем информации, а также строится линия (поверхность) положения. Аналогично по разности фаз сигналов от опорной станции и от другой ведомой станции находится разность дальностей между ними и потребителем информации и строится еще одна линия (поверхность) положения. Для определения своих координат потребитель информации кроме линий (поверхностей) положения имеет в базе данных координаты опорной и ведомых станций (рис. 1).

При развертывании опорной и ведомых станций на местности определяются их прямоугольные координаты  $x_i, y_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) известными в топогеодезии методами. Опорная станция (ОС<sub>1</sub>) излучает радиосигнал, в структуре которого присутствуют признак принадлежности к ОС<sub>1</sub>, координаты ОС<sub>1</sub> и синхронизирующий импульс. ОС<sub>1</sub> работает только в режиме излучения. Вторая и третья ведомые станции принимают сигналы только по признаку принадлежности его к первой. При выполнении этого условия ВС<sub>2</sub> (ВС<sub>3</sub>) излучает сигнал, в структуре которого, так же, как и для ОС<sub>1</sub>, содержатся признак принадлежности к ВС<sub>2</sub> (ВС<sub>3</sub>), координаты ВС<sub>2</sub> (ВС<sub>3</sub>) и синхронизирующий импульс. Таким образом, в каждой точке электромагнитного навигационного поля присутствуют признаки опорной и ведомых станций, их координаты и синхронизирующие импульсы. Однозначность измерения дальности в фазовых системах навигации обеспечивается только в пределах длины волны несущего колебания. Для разрешения многозначности измерений используют импульсно-фазовые системы;

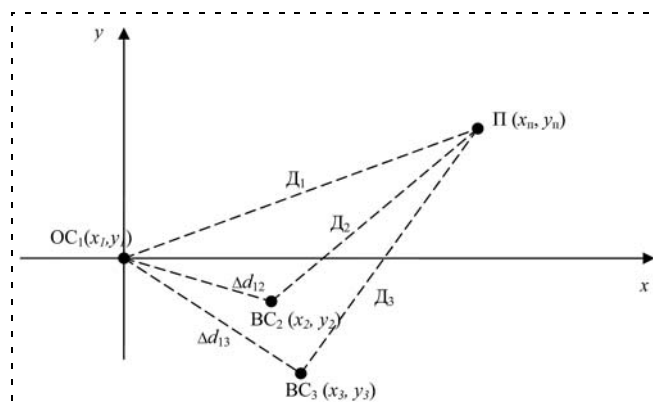


Рис. 1. Схема взаимного расположения опорной, ведомых станций и потребителя информации

их навигационный сигнал представляет собой пачку когерентных импульсов, несущая частота которых служит для точного, а огибающая — для грубого измерения разности дальностей в целях устранения многозначности точных измерений [7].

### Способы выставки бортовой аппаратуры систем управления летательных аппаратов

В качестве одного из возможных подходов к решению задач повышения точности, сокращения времени операций предстартовой подготовки, а также коррекции и переприцеливания автономных инерциальных навигационных систем ЛА предлагается применить способ аналитической выставки бортовой аппаратуры. Сущность данного способа заключается в использовании радиосигналов навигационных космических аппаратов (КА) при определении местоположения ЛА, а также для последующей выставки и коррекции его бортовой аппаратуры системы управления (БАСУ).

Как показал анализ ТТХ приемной аппаратуры потребителей СНС, в настоящее время возможно высокоточное определение координат местоположения объекта с помощью сигналов КА [2—4]. Далее, при известных координатах цели в результате решения обратной геодезической задачи (ОГЗ) вычисляется угол прицеливания ЛА, для передачи которого на борт необходим гирокомпас и ряд оптических приборов. Из этого следует, что основную трудность при выставке бортовой аппаратуры по направлению имеет техническая реализация процесса определения азимутов и других ориентирных направлений, а также передача их в бортовую аппаратуру ЛА.

Эту трудность можно обойти, если использовать сигналы СНС для точного нахождения местоположения, ориентации в пространстве и азимутального наведения ЛА на цель. При этом сделаем допущение о том, что в состав ЛА должна входить бортовая радиолокационная станция (БРЛС), которая в последующем может быть использована при решении задач преодоления системы противоракетной обороны, коррекции параметров траектории полета ЛА и идентификации объекта поражения [4—7].

В качестве измеряемых в БРЛС радионавигационных параметров (РНП) используются время прихода радиосигналов и доплеровский сдвиг частоты. Данным РНП соответствует дальность между КА и ЛА, а также радиальная скорость их относительного движения.

Время прихода сигналов определяется по шкалам времени БРЛС и зависит от момента излучения сигнала КА относительно шкалы времени СНС, а также взаимного сдвига шкал времени БРЛС и СНС и задержки распространения сигналов. Измерение времени прихода сигналов с  $i$ -го КА эквивалентно измерению квазидальности  $R_{квi}$ , которая может быть представлена в следующем виде:

$$R_{квi} = R_{0i} + c\Delta t_{pi} + c(\Delta t_{п} - \Delta t_{КАi}), \quad (1)$$

где  $R_{0i}$  — истинная наклонная дальность от БРЛС до  $i$ -го КА;  $c$  — скорость распространения радиоволн;  $\Delta t_{pi}$  — приращение задержки времени за счет влияния атмосферы (тропосферы и ионосферы);  $\Delta t_{п}$  — расхождение шкалы времени БРЛС относительно шкалы времени СНС;  $\Delta t_{КАi}$  — расхождение шкалы времени  $i$ -го КА относительно шкалы времени СНС.

Истинная наклонная дальность от БРЛС до  $i$ -го КА определяется их взаимным расположением в пространстве:

$$R_{0i} = \sqrt{(X_{КАi} - X_{п})^2 + (Y_{КАi} - Y_{п})^2 + (Z_{КАi} - Z_{п})^2}, \quad (2)$$

где  $X_{КАi}$ ,  $Y_{КАi}$ ,  $Z_{КАi}$  — координаты  $i$ -го КА в геоцентрической прямоугольной системе координат;  $X_{п}$ ,  $Y_{п}$ ,  $Z_{п}$  — координаты БРЛС в той же системе отсчета.

Координаты  $X_{КАi}$ ,  $Y_{КАi}$ ,  $Z_{КАi}$  и расхождение шкалы времени  $i$ -го КА относительно шкалы времени СНС ( $\Delta t_{КАi}$ ) передаются с борта КА.

Из выражений (1) и (2) следует, что измеренное значение квазидальности  $R_{квi}$  является функцией четырех неизвестных —  $X_{п}$ ,  $Y_{п}$ ,  $Z_{п}$  и  $\Delta t_{п}$ .

Измерения квазидальности по радиосигналам четырех КА позволяют составить систему из четырех уравнений относительно указанных неизвестных и тем самым решить навигационно-временную задачу, в результате которой рассчитываются координаты БРЛС, а, следовательно, и ЛА.

Для определения угловой ориентации ЛА (осей чувствительности приборов системы управления) рассмотрим следующие варианты реализации способа аналитической выставки.

*Вариант 1.* Ориентация приборов БАСУ на основе метода пелленгационных измерений.

Сущность ориентации ЛА в данном случае заключается в определении угла прицеливания  $\alpha_{пр}$ , представляющего собой горизонтальный угол между геометрическим центром антенного блока и направлением на цель, и прицеливании приборов. Для технической реализации данного варианта в качестве приемного устройства БРЛС может служить антенная решетка [4, 6, 8].

*Вариант 2.* Ориентация приборов БАСУ на основе метода радиоинтерферометрических измерений [2, 3, 7]. Реализация второго варианта основана на том, что разнесенные на некоторое расстояние (базу) две ненаправленные или слабонаправленные антенны принимают сигнал от одного источника. Измерительное устройство оценивает разность хода сигнала до антенн, которая определяет положение базовой линии (ее центр) относительно КА, но не в пространстве. Для оценки ориентации базовой линии в двумерном пространстве необходимо иметь разность хода относительно второго КА. Величины, определяющие ориентацию базы в дву-

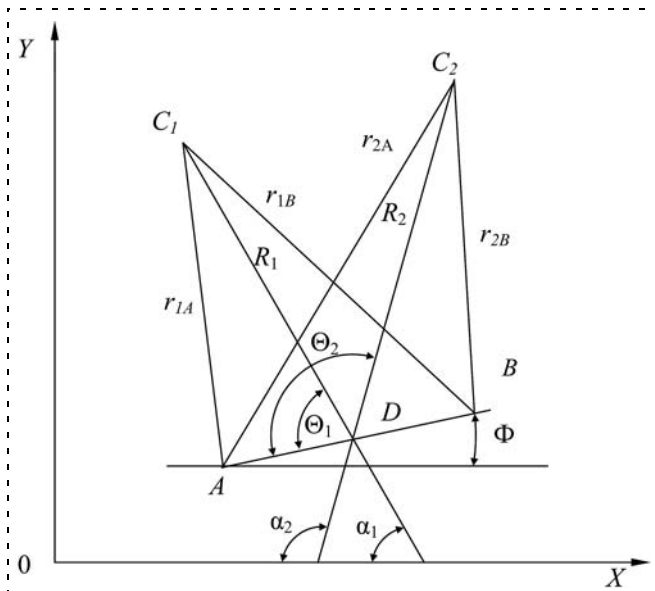


Рис. 2. Определение ориентации базы в двумерном пространстве

мерном пространстве, представлены на рис. 2, где  $C_1$  и  $C_2$  — соответственно  $KA_1$  и  $KA_2$ ;  $AB$  — базовая линия с центром  $D$ ;  $\Theta_1, \Theta_2$  — углы прихода волны.

В случае, когда база  $AB = d$  и лежит в плоскости  $C_1C_2D$  (или является проекцией на эту плоскость), и полагая  $1 \gg d/2R^2$  ( $R$  — расстояние от КА до потребителя), разности хода сигналов  $C$  до антенн  $A$  и  $B$  определяются из следующих выражений:

$$\Delta r_1 = r_{1B} - r_{1A} = d \cos \Theta_1; \quad (3)$$

$$\Delta r_2 = r_{2B} - r_{2A} = d \cos \Theta_2; \quad (4)$$

$$\Delta r_1 - \Delta r_2 = d(\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2). \quad (5)$$

Так как  $\alpha_1 = \Theta_1 - \Phi$  и  $\alpha_2 = \Theta_2 - \Phi$ , то, подставив их в выражение (5), получим:

$$(E_1^2 + E_2^2) \cos^2 \Phi - 2E_1 E_2 \cos \Phi + E_3^2 - E_2^2 = 0, \quad (6)$$

где  $E_1 = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2$ ;  $E_2 = \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1$ ;  $E_3 = (\Delta r_1 - \Delta r_2)/d$ .

Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  находятся по известным координатам КА и центра базы ( $D$ ). Длина базы считается известной, а разности  $\Delta r_1$  и  $\Delta r_2$  измеряются:

$$\Delta r_1 = \lambda(n_{1B} - n_{1A}) + \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_{1B} - \varphi_{1A}); \quad (7)$$

$$\Delta r_2 = \lambda(n_{2B} - n_{2A}) + \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_{2B} - \varphi_{2A}), \quad (8)$$

где  $n$  — число целых длин волн, укладывающихся на трассе КА —  $D$ ;  $\varphi$  — фаза колебания, принятого соответствующей антенной от соответствующего КА.

Угол  $\Phi$  находится из решения уравнения (6) и характеризует положение базы в двумерном пространстве [2—4].

### Особенности измерения текущих навигационных параметров в аппаратуре потребителей

Наряду с традиционными схемами измерений и измеряемыми параметрами, принятыми в спутниковой навигации, такими, как псевдодальность и псевдоскорость, в аппаратуре топогеодезической привязки возможны и некоторые другие. Например, как уже было упомянуто выше, возможно использование радиоинтерферометрических методов, применение которых не требует знания структуры кодов и модулирующих несущих полезного сигнала. Основными источниками погрешностей определения относительных координат при этом являются: погрешности измерения относительной задержки сигналов, принятых в разнесенных пунктах; нестабильность генераторов; некомпенсированные остаточные погрешности, обусловленные ионосферой и тропосферой; неточность знания положения КА.

В интересах компенсации систематических погрешностей возможны измерения двойных разностей радиоинтерферометрических и интегральных доплеровских измерений, относящихся к разным КА [9—11].

Наивысшую точность геодезических определений дают фазовые измерения на несущей частоте. При этом необходимо вычислять так называемые двойные и тройные разности фаз.

Фаза  $\varphi_{Aj}(T)$  сигнала  $j$ -го КА, принятого объектом  $A$  в момент времени  $T$ , относительно фазы сигнала генератора объекта может быть представлена в виде

$$\varphi_{Aj}(T) = \varphi_A(T_0) - \varphi_j(T_0) + 2\pi(f_A - f_j)(T - T_0) + \frac{2\pi f_j}{C} [R_{Aj}(T)] + \varphi_{иAj} + \varphi_{тAj}, \quad (9)$$

где  $\varphi_A(T_0)$ ,  $\varphi_j(T_0)$  — фазы сигналов генераторов объекта  $A$  и  $j$ -го КА в момент излучения  $T_0$ ;  $f_A$ ,  $f_j$  — частоты генераторов объекта  $A$  и  $j$ -го КА;  $R_{Aj}$  — расстояние между  $j$ -м КА и объектом  $A$ ;  $\varphi_{и}$ ,  $\varphi_{т}$  — приращения фазы, вызванные ионосферной и тропосферной задержками.

Если прием сигналов  $j$ -го КА ведется одновременно объектами  $A$  и  $B$ , то выражения для разности фаз принимаемых сигналов с использованием соотношения (9) может быть записано в виде

$$\varphi_{AB}(T) = \alpha_{AB} + 2\pi(f_A - f_B)(T - T_0) + \frac{2\pi f_j}{C} [R_{Aj}(T) - R_{Bj}(T)] + \varphi_{иABj} + \varphi_{тABj}, \quad (10)$$

где  $\alpha_{AB} = \varphi_A(T_0) - \varphi_B(T_0)$  — начальное расхождение фаз сигналов генераторов объектов  $A$  и  $B$ ;  $\varphi_{иABj} = \varphi_{иAj} - \varphi_{иBj}$ ;  $\varphi_{тABj} = \varphi_{тAj} - \varphi_{тBj}$  — разности фаз

принятых в пунктах  $A$  и  $B$  сигналов, обусловленные ионосферой и тропосферой.

Из сравнения (9) и (10) следует, что переход от измерения фазы  $\varphi_{Aj}(T)$ , соответствующей измерению псевдодальности на несущей частоте, к измерению фазы  $\varphi_{ABj}(T)$ , соответствующей разности расстояний между  $j$ -м КА и объектами  $A$  и  $B$ , приводит к исключению неопределенности, связанной с незнанием начальных фаз генераторов КА и объекта  $A$ .

В (10) кроме координат объектов  $A$  и  $B$  неизвестными являются  $\alpha_{AB}$  и  $f_A - f_B$ .

Пусть теперь объектом  $A$  принимаются сигналы  $j$ -го КА в моменты  $T_1$  и  $T_2$ , тогда можно образовать разность фаз по времени:

$$\begin{aligned} \varphi_A(T_1, T_2) &= \varphi_{Aj}(T_1) - \varphi_{Aj}(T_2) = \\ &= \varphi_A(T_0) + 2\pi f_A(T_1 - T_0) - \varphi_j(T_0) - \\ &- 2\pi f_j(T_1 - T_0) + 2\pi f_j/c[R_{Aj}(T_1)] - 2\pi f_A(T_2 - T_0) + \\ &+ \varphi_j(T_0) + 2\pi f_j(T_2 - T_0) - 2\pi f_j/c[R_{Aj}(T_2)] + \\ &+ \varphi_{иА}(T_1, T_2) + \varphi_{тА}(T_1, T_2) = 2\pi f_A(T_2 - T_1) + \\ &+ 2\pi f_j(T_2 - T_1) + 2\pi f_j/c[R_{Aj}(T_1) - R_{Aj}(T_2)] + \\ &+ \varphi_{иА}(T_1, T_2) + \varphi_{тА}(T_1, T_2), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\varphi_{иАj}(T_1, T_2) = \varphi_{иАj}(T_1) - \varphi_{иАj}(T_2)$ ;  $\varphi_{тАj}(T_1, T_2) = \varphi_{тАj}(T_1) - \varphi_{тАj}(T_2)$ .

При этом оказываются скомпенсированными начальные фазы генераторов КА и объекта  $A$ .

Если объектом  $B$  также принимаются сигналы  $j$ -го КА в моменты  $T_1$  и  $T_2$ , то можно образовать двойную разность фаз:

$$\begin{aligned} \varphi_{AB}(T_1, T_2) &= \varphi_A(T_1, T_2) - \varphi_B(T_1, T_2) = \\ &= 2\pi f_A(T_2 - T_1) + 2\pi f_j(T_2 - T_1) + 2\pi f_j/c[R_{Aj}(T_1) - \\ &- R_{Aj}(T_2)] + \varphi_{иАj}(T_1, T_2) + \varphi_{тАj}(T_1, T_2) - \\ &- 2\pi f_B(T_2 - T_1) - 2\pi f_j(T_2 - T_1) - 2\pi f_j/c[R_{Bj}(T_1) - \\ &- R_{Bj}(T_2)] - \varphi_{иВj}(T_1, T_2) - \varphi_{тВj}(T_1, T_2) = \\ &= 2\pi(f_A - f_B)(T_2 - T_1) + 2\pi f_j/c[R_{Aj}(T_1) - R_{Aj}(T_2) - \\ &- R_{Bj}(T_1) + R_{Bj}(T_2)] + \varphi_{иАВ}(T_1, T_2) + \varphi_{тАВ}(T_1, T_2). \end{aligned} \quad (12)$$

Если КА излучают на одной частоте  $f_j$ , то можно предложить другую последовательность получения двойной разности фаз.

С учетом выражения (12) можно вычислить так называемые двойные разности фаз  $\varphi_{ABjk}$  относительно  $i$ -го и  $k$ -го КА:

$$\begin{aligned} \varphi_{ABjk} &= \alpha_{ABjk} + 2\pi f_j/c[R_{Bk}(T) - R_{Ak}(T) - \\ &- R_{Bj}(T) + R_{Aj}(T)] + \varphi_{тАВjk} + \varphi_{иАВjk}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_{ABjk} &= \alpha_{ABk}(T) - \alpha_{ABj}(T); \\ \varphi_{тАВjk} &= \varphi_{тАj} - \varphi_{тВj} - \varphi_{тАк} + \varphi_{тВк}; \\ \varphi_{иАВjk} &= \varphi_{иАj} - \varphi_{иВj} - \varphi_{иАк} + \varphi_{иВк}. \end{aligned}$$

Из (13) видно, что двойные разности фаз не содержат параметры, определяющие разность частот генераторов объектов  $A$  и  $B$ .

Если объектами  $A$  и  $B$  принимаются сигналы  $j$ -го КА в моменты  $T_1$  и  $T_2$ , то можно образовать так называемые двойные разности фаз по времени:

$$\begin{aligned} \varphi_{AB}(T_1, T_2) &= \varphi_{ABj}(T_2) - \varphi_{ABj}(T_1) = \\ &= 2\pi(f_B - f_A)(T_2 - T_1) + \varphi_{иАВ}(T_1, T_2) + \\ &+ \varphi_{иАВ}(T_1, T_2) + \varphi_{тАВ}(T_1, T_2) + 2\pi f_j/c[R_{Bj}(T_2) - \\ &- R_{Bj}(T_1) - R_{Aj}(T_2) + R_{Aj}(T_1)]. \end{aligned} \quad (14)$$

С учетом выражений (13) и (14) могут быть образованы так называемые тройные разности фаз:

$$\begin{aligned} T_{ABjk}(T_1, T_2) &= \varphi_{ABjk}(T_2) - \varphi_{ABjk}(T_1) = \\ &= \varphi_{ABk}(T_1, T_2) - \varphi_{ABj}(T_1, T_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, погрешности, определяемые расхождением фаз и частот генераторов объектов  $A$ ,  $B$  и КА, а также частично атмосферные погрешности оказываются скомпенсированными. Вместе с тем, число полученных таким образом измерений в четыре раза меньше первоначального числа разностей фаз. Платой за компенсацию погрешностей является потеря информативности.

Действительно, геометрическим аналогом разности фаз  $\varphi_{AB}(T)$  является угловое положение  $j$ -го КА относительно базы, образованной углами  $A$  и  $B$ . Для двойной разности фаз  $\varphi_{ABj}(T_1, T_2)$  — это угловая скорость  $j$ -го КА относительно базы  $AB$ . Для тройной разности фаз  $\varphi_{ABjk}(T_1, T_2)$  — это разность угловых скоростей  $j$ -го и  $k$ -го КА, т. е. скорость изменения угловых размеров базы, образованной объектами  $A$  и  $B$  и наблюдаемой из КА.

В связи с низкой информативностью тройной разности фаз на практике предпочтительнее использовать двойную разность фаз и аналитические (расчетные) методы компенсации оставшихся погрешностей.

В некоторых схемах измерений можно повысить информативность за счет использования взаимных измерений между объектами, согласования их шкал и синхронизации частот генераторов. Такие схемы позволяют реализовать как двойные, так и тройные разности фаз.

Наиболее сложной проблемой фазовых измерений является неоднозначность отчетов фазы, связанная с необходимостью определения полного числа циклов фаз на несущей частоте. В связи со значительным пространственным разнесом КА и объектов и малой длиной волны несущего колебания  $\lambda$  эта проблема не решается даже при измерении двойной разности фаз. Положение усугубляется различным влиянием атмосферы (особенно ионосферы) на скорость распространения фазы несущего колебания и огибающей сигнала ( $P$  и  $C/A$ -кода). Ошибка измерения за счет атмосферы может составить несколько периодов несущего колебания. Поэтому при фазовых измерениях на несущей принципиально необходимо применение дисперсионных многочастотных методов.



### Особенности организации навигационных измерений в аппаратуре малоподвижных и стационарных потребителей

Как было рассмотрено выше, использование рабочего созвездия КА позволяет решать две основные задачи геодезии: абсолютную и относительную. Абсолютная задача сводится к определению координат объектов в абсолютной геоцентрической системе координат. Относительная задача предполагает определение относительных координат двух и более объектов (пунктов) без существенных ограничений на точность их абсолютных координат.

В отличие от традиционных навигационных определений решение геодезических задач часто не требует высокой оперативности. В то же время требования по точности абсолютных и, особенно, относительных определений в геодезии значительно выше, это приводит к необходимости более тщательного учета всех составляющих ошибок, которые и определяют конечную точность решения геодезической задачи. Особо возрастает роль систематических и медленно меняющихся составляющих погрешностей, которые не могут быть сглажены (отфильтрованы) при снятии ограничений на объем измерительной информации и оперативность определения координат [8]. Данные о точности государственных и специальных геодезических сетей (ГГС и СГС) приведены в таблице.

Принципиальное отличие задачи геодезических определений от традиционных навигационных состоит в том, что определяющихся объектов — два и более, они пространственно разнесены, измерения проводятся, как правило, одновременно, между объектами возможны информационный обмен, взаимные измерения, сверка шкал часов и синхронизация частот генераторов (например, при создании пунктов локальной геодезической сети).

Указанный выше подход позволяет надеяться на то, что возможна компенсация системных ошибок, являющихся общими для определяющихся объектов, или ошибок, относящихся к разным объектам, между которыми существует аналитическая или статистическая связь. Здесь существует аналогия с двухчастотным методом компенсации ионосферных составляющих ошибок в навигации, когда введение частотной избыточности позволяет получить информацию о состоянии ионосферы и тем самым

Характеристики геодезических сетей

Виды геодезических сетей	Срединные ошибки определения	
	координат пунктов (м)	ориентирных направлений (")
ГГС	0,25	1...5
СГС-15	1,3	10
СГС-30	2,0	20
СГС-60	3,0	40

учесть ее мешающее воздействие. Точно так же введение пространственной (пространственно-частотной) избыточности (два разнесенных объекта) позволяет компенсировать (при некоторых условиях) такие составляющие ошибок, как ионосферные, тропосферные, расхождение шкал КА и другие. При этом компенсация возможна как за счет образования соответствующих разностей, так и за счет расширения состава оцениваемых параметров в соответствии со следующей фундаментальной разностной теоремой: "Линейные смещения могут быть вычислены либо уменьшением числа величин для устранения этих смещений путем образования разностных величин, либо включением этих смещений в число неизвестных".

Промежуточное положение по точности занимает так называемый дифференциальный режим (метод транслокации), когда считаются известными координаты одного из пунктов (контрольной станции).

Таким образом, даже решение абсолютной задачи геодезии, но для двух и более пунктов, при соответствующем подходе позволяет в принципе получить более высокую точность координат пунктов, чем для единичного объекта навигации. Еще большая точность может быть получена при определении относительных координат пунктов.

### Заключение

Как показывают исследования, проведенные в [5—8], реализация рассмотренных выше систем, способов, алгоритмов и процедур в навигационной аппаратуре комплексированных систем управления, а в перспективе — при построении систем высокоточного навигационно-временного обеспечения высокодинамичных летательных аппаратов позволит:

- более полно использовать потенциал имеющихся и перспективных навигационных систем;
- значительно расширить возможности и улучшить эффективность применения подразделений топогеодезического обеспечения;
- повысить надежность навигационных измерений (определений);
- повысить мобильность существующих и перспективных ЛА;
- повысить автономность навигационных определений;
- более точно формировать начальные условия выставки БАСУ ЛА и проводить их корректировку в полете;
- реализовать более гибкие алгоритмы управления ЛА;
- в большей степени автоматизировать процессы предстартовой подготовки ЛА;
- сократить время подготовки и пуска ЛА, а следовательно, и время реакции комплексов вооружения в целом.

## Список литературы

1. Лысенко Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 672 с.
2. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов сухопутных войск / Под ред. В. Л. Солунина. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 328 с.
3. Разоренов Г. Н., Бахрамов Э. А., Титов Ю. Ф. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 2003. 584 с.
4. Епифанов А. Д. Избыточные системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
5. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. / Под ред. В. С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
6. Бакулев А. П., Сосновский А. А. Радиолокационные и радионавигационные системы: Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1994. 296 с.

7. Ульянов Г. Н., Колесниченко С. В., Сулима А. А. и др. Система навигации. Патент на Полезную модель № 44190 от 28.10.04.
8. Колесниченко С. В., Суворин Е. И., Первухин Д. А. и др. Способ предстартовой выставки бортовой аппаратуры высокоточных ракет. Патент РФ № 2150124 от 27.05.2000.
9. Бабич О. А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
10. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. 312 с.
11. Клюев Н. Ф., Степанов М. Г., Ткачев Е. А., Фатеев В. Ф. Вопросы приема и обработки сигналов в измерительных каналах навигационных и геодезических систем. СПб.: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1996. 80 с.

УДК 681.5:517.935

А. А. Кабанов, аспирант,  
Севастопольский национальный  
технический университет,  
patronne@mail.ru

## Система автоматической посадки летательного аппарата корабельного базирования\*

### Часть 2. Подсистема вертикального снижения

*Рассматривается завершающая фаза автоматической посадки летательного аппарата с вращающимся вектором тяги (ЛАВТ). Обсуждаются вопросы, связанные с построением подсистемы снижения, которая обеспечивает вертикальное приведение ЛАВТ по относительным характеристикам движения вплоть до касания с посадочной площадкой судна.*

**Ключевые слова:** летательный аппарат, система посадки, терминальное управление, волновые возмущения, посадочный маневр

#### 1. Синтез подсистемы снижения

В условиях отсутствия внешних возмущений (в первую очередь, ветроволновых возмущений) для решения задачи вертикального приведения летательного аппарата с вращающимся вектором тяги (ЛАВТ) за заданное конечное время достаточно воспользоваться терминальным законом управления, формирующим, к примеру, вертикальное ускорение  $A_y$ . Однако при морском волнении из-за случайного, неуправляемого движения посадочной площадки (ПП) помимо задачи приведения по высоте возникает также задача выбора наиболее благоприятной обстановки для выполнения посадочного маневра — задача поиска "окна посадки" [1].

\* Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 11, 2010.

В связи с этим сосредоточим внимание собственно на алгоритме формирования заданного ускорения  $A_y$  и процедуре выбора интервала вертикального снижения.

Предположим, что в рассматриваемой фазе посадки динамика движения ЛАВТ относительно ПП описывается линейным дифференциальным уравнением для вектора  $x \in R^n$ :

$$\dot{x} = A_c x + B_c u + G_c v, \quad 0 < t_s \leq t_f. \quad (1)$$

Здесь вектор  $x$  содержит компоненты, описывающие динамику ЛАВТ — подвектор  $x_L \in R^k$  — и динамику ПП — подвектор  $x_P \in R^m$ ,  $m + k = n$ . Пренебрегая взаимным влиянием  $x_L$  и  $x_P$ , матрицу  $A_c$  в (1) будем иметь блочно-диагональной (далее переносимые, соответствующие ЛАВТ, помечаем индексом "л", соответствующие ПП — индексом "п"):

$$A_c = \text{diag}(A_L, A_P),$$

где размерности блоков определяются размерностями векторов  $x_L$  и  $x_P$ . Векторы  $u$  и  $v$  суть векторы управлений и возмущений соответственно.

Рассматриваем тот случай, когда управление сосредоточено в канале ЛАВТ, а возмущение — в ПП, т. е.

$$B_c^T = (B_L^T, 0), \quad G_c^T = (0, G_P^T).$$

Считаем также возмущение  $v$  белым шумом с нулевым средним и интенсивностью  $V$ .

Так же, как и в подсистеме торможения, управление здесь строим на основе дискретной модели непрерывной системы (1), используя дискретные методы синтеза. В пользу последних говорит и простота реализации и отсутствие особенностей, характерных для непрерывных методов.

Дискретизируя систему (1) с периодом  $T_0$ , получаем дискретную модель вида

$$x(k+1) = A(T_0)x(k) + B(T_0)u(k) + G(T_0)v(k), \quad 0 < N_s \leq N_s + n_r. \quad (2)$$

Как говорилось выше, в качестве управления ищем вертикальное ускорение, минимизирующее квадратичный критерий качества наведения

$$J_s(u) = E \left( \frac{1}{2} (f_1 e_1^2 (N_s + n_\tau) + f_2 e_2^2 (N_s + n_\tau)) + \frac{1}{2} \sum_{k=N_s}^{N_s+n_\tau-1} u^2(k) \right), \quad (3)$$

где  $e_1 = Y_{\text{л}} - Y_{\text{п}}$  — вертикальное отклонение координаты центра масс ЛАВТ от текущего стояночного положения на ПП;  $e_2 = \dot{e}_1 = V_{Y_{\text{л}}} - V_{Y_{\text{п}}}$  — вертикальная скорость ЛАВТ относительно ПП;  $N_s T_0 = t_s$  — момент начала вертикального приведения;  $(N_s + n_\tau) T_0 = t_s + \tau$  — момент окончания вертикального приведения;  $\tau$  — временной интервал снижения ЛАВТ вплоть до касания с ПП.

Первые два слагаемых в (3) характеризуют точность завершения процесса посадки по вертикальным координате и скорости, а сумма характеризует суммарные ускорения (или суммарную перегрузку ЛАВТ) на интервале наведения ( $t_s, t_s + \tau$ ). Индекс  $s$  у функционала указывает на тот факт, что значение функционала зависит еще и от состояния системы (2) в момент  $N_s T_0 = t_s$ . Весовые множители  $f_1, f_2 > 0$  задают точность выполнения конечного условия  $e = (e_1, e_2) = 0$ : при  $\min(f_1, f_2) \rightarrow \infty$  ошибка  $e \rightarrow 0$ .

При фиксированных  $t_s$  и  $\tau$  решение задачи на минимум (3) при ограничении (2) имеет вид [2]

$$\mathbf{u}(k) = -(1 + \mathbf{B}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(k+1) \mathbf{A} \mathbf{x}(k), \quad (4)$$

где  $\mathbf{P}(k)$  удовлетворяет разностному уравнению Риккати:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k) &= \mathbf{A}^T (\mathbf{P}^{-1}(k+1) + \mathbf{B} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{A}, \\ \mathbf{P}(N_s + n_\tau) &= \mathbf{H}^T \mathbf{F} \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (5)$$

В последнем выражении  $\mathbf{H} = (\mathbf{H}_{\text{л}}, -\mathbf{H}_{\text{п}})$  преобразования  $\mathbf{H}_{\text{л}}, \mathbf{H}_{\text{п}}$  выделяют координаты и скорости из соответствующих векторов состояния  $\mathbf{x}_{\text{л}}, \mathbf{x}_{\text{п}}$ ;  $\mathbf{F} = \text{diag}(f_1, f_2)$ .

Выбор "окна посадки" реализуем по аналогии с непрерывным алгоритмом из [3, 4], основная идея которого заключается в нахождении локального минимума критерия (3).

На оптимальном решении (4) достигается минимальное значение критерия (3), равное [2]

$$\begin{aligned} \hat{J}_s &= \hat{J}_1 + \hat{J}_2; \\ \hat{J}_1 &= \mathbf{x}^T(N_s) \mathbf{P}(N_s) \mathbf{x}(N_s); \hat{J}_2 = \sum_{k=N_s+1}^{N_s+n_\tau} \text{tr}(\mathbf{P}(k) \mathbf{G} \mathbf{V} \mathbf{G}^T). \end{aligned} \quad (6)$$

Простой подстановкой несложно показать, что решение уравнения (5) можно представить в виде

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{W}^T(k) (\mathbf{M}(k) + \mathbf{F}^{-1})^{-1} \mathbf{W}(k), \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(k) &= \mathbf{W}(k+1) \mathbf{A}; \mathbf{W}(N_s + n_\tau) = \mathbf{H}; \\ \mathbf{M}(k) &= \mathbf{M}(k+1) + \mathbf{W}(k+1) \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{W}^T(k+1); \\ \mathbf{M}(N_s + n_\tau) &= 0. \end{aligned}$$

Из последних соотношений можно получить аналитическое выражение для  $\mathbf{P}(k)$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(k) &= \mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-k}; \\ \mathbf{M}(k) &= \sum_{l=k}^{N_s+n_\tau-1} \mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-l-1} \mathbf{B} (\mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-l-1} \mathbf{B})^T; \quad (8) \\ \mathbf{P}(k) &= (\mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-k})^T \left( \sum_{l=k}^{N_s+n_\tau-1} \mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-l-1} \mathbf{B} \times \right. \\ &\quad \left. \times (\mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-l-1} \mathbf{B})^T + \mathbf{F}^{-1} \right)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-k}. \end{aligned}$$

С учетом (8) функционал в (6) можно определить как квадратичную форму, определенную на значениях оптимального прогноза состояния системы или его линейных форм — ошибок наведения. Обозначив

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k, N_s + n_\tau) &= \mathbf{A}^{N_s+n_\tau-k} \mathbf{x}(k); \\ \hat{\mathbf{e}}(k, N_s + n_\tau) &= \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}(k, N_s + n_\tau), \end{aligned} \quad (9)$$

для слагаемого  $\hat{J}_{s1}$  получаем:

$$\begin{aligned} \hat{J}_1(k, N_s + n_\tau) &= \\ &= \hat{\mathbf{e}}^T(k, N_s + n_\tau) (\mathbf{M}(k) + \mathbf{F}^{-1})^{-1} \hat{\mathbf{e}}(k, N_s + n_\tau). \end{aligned} \quad (10)$$

Слагаемое  $\hat{J}_1$  зависит только от  $N_s T_0 = t_s$ , а  $\hat{J}_2$  — от  $(N_s + n_\tau) T_0 - N_s T_0 = \tau$ , причем при  $(N_s + n_\tau) T_0 \rightarrow N_s T_0$  компонента  $\hat{J}_2 \rightarrow 0$ . Слагаемое  $\hat{J}_2$  характеризует ошибку прогноза, пропорциональную интенсивности  $V$  шума  $\mathbf{v}$ . Последнее означает, что с уменьшением времени упреждения точность прогноза возрастает, поэтому при достаточно малом  $n_\tau T_0 = \tau$  выбор момента начала снижения с высокой степенью достоверности можно основывать на выражении (10).

В результате получаем следующий дискретный алгоритм вертикального снижения, аналогичный непрерывному [3, 4]:

1. Исходя из интенсивности волновых возмущений и инерционности системы управления выбираются длительность интервала наведения  $n_\tau T_0 = \tau$ , начальные значения высоты  $Y_{\text{л}0}$  и вертикальной скорости центра масс ЛАВТ  $V_{Y_{\text{л}0}}$ , локального минимума  $J_{\text{л} \min}$  (10) по  $(N_s + n_\tau) T_0 = t_s + \tau$ , критической высоты  $Y_{\text{лк}}$  и вариации  $dJ_1$ .

2. Анализ начинается при  $t = 0$  из выбранных на предыдущем шаге начальных условий для ЛАВТ

с вычислением в реальном времени функции (10) с шагом дискретности  $T_0 \leq 0,1$  с и ее табулированием в памяти бортового компьютера.

3. По мере накопления значений  $J_\tau(k) = J_1(k, N_s + n_\tau)$  ищется локальный минимум  $J_\tau(k)$  по  $k$ .

4. При условии  $\max_{k \in \{0, 1, 2, \dots\}} J_\tau(k) < J_{1\min}$  полагаем  $N_s = k$ , начинаем процесс наведения, т. е. организуем управление системой (1) в соответствии с (4), (8) на интервале  $k \in [N_s, N_s + n_\tau - 1]$  и переходим к пункту 5.

5. Иначе продолжаем пункт 3, если  $Y_L(k) > Y_{\text{ЛК}}$ .

6. Иначе возвращаемся к пункту 1.

7. Одновременно с управлением  $\forall k \in [N_s, N_s + n_\tau - 1]$  вычисляем минимум (10), где  $N_s + n_\tau$  уже фиксировано, и, если  $J_1(N_s, N_s + n_\tau) < dJ_1$ , то продолжаем пункт 4.

8. Иначе — запрет посадки и переход к пункту 1.

Представленный выше алгоритм является дискретным аналогом алгоритма, предлагаемого в [3, 4]. Основное его преимущество — простота реализации, которая, прежде всего, заключается в отсутствии операций интегрирования.

## 2. Результаты моделирования

В соответствии с рекомендациями по выбору шага дискретности для дискретизации подсистемы снижения возьмем  $T_0 = 0,1$  с. Поскольку в качестве управления было выбрано вертикальное ускорение ЛАВТ, то вектор состояния  $x_L$  можно взять двумерным, при этом его компонентами являются вертикальная координата  $Y_L$  и вертикальная скорость  $V_{Y_L}$ . Тогда матрицы  $A_L$  и  $B_L$  будут иметь вид

$$A_L = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B_L = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Для реализации вертикальной качки ПП воспользуемся ее математической моделью из [5], которая представляет собой систему 4-го порядка

$$\dot{x}_\Pi = A_\Pi x_\Pi + G_\Pi v \quad (11)$$

с вектором состояния  $x_\Pi = \text{col}(Y_\Pi, V_{Y_\Pi}, a_\Pi, \dot{a}_\Pi)$ ; с  $4 \times 4$ -матрицей  $A_\Pi$ , имеющей собственные числа  $\rho_1 = -0,1412 + 0,7627i$ ,  $\rho_2 = -0,2597 + 0,751i$ ,  $\rho_3 = -0,1412 - 0,7627i$  и  $\rho_4 = -0,2597 + 0,751i$ ;

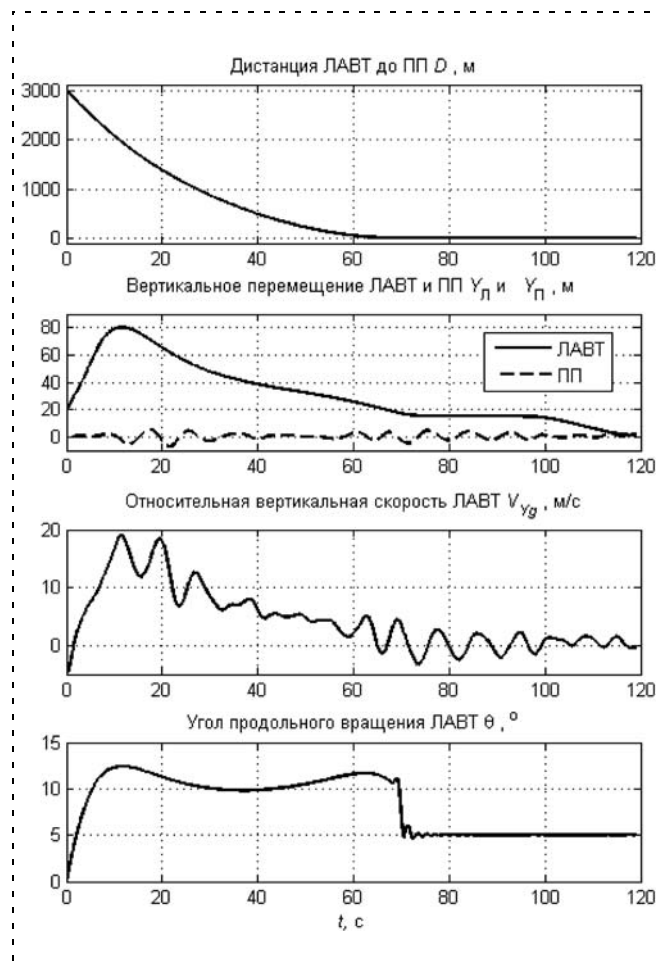


Рис. 1. Результат моделирования системы посадки ЛАВТ при  $\tau = 19,5$  с

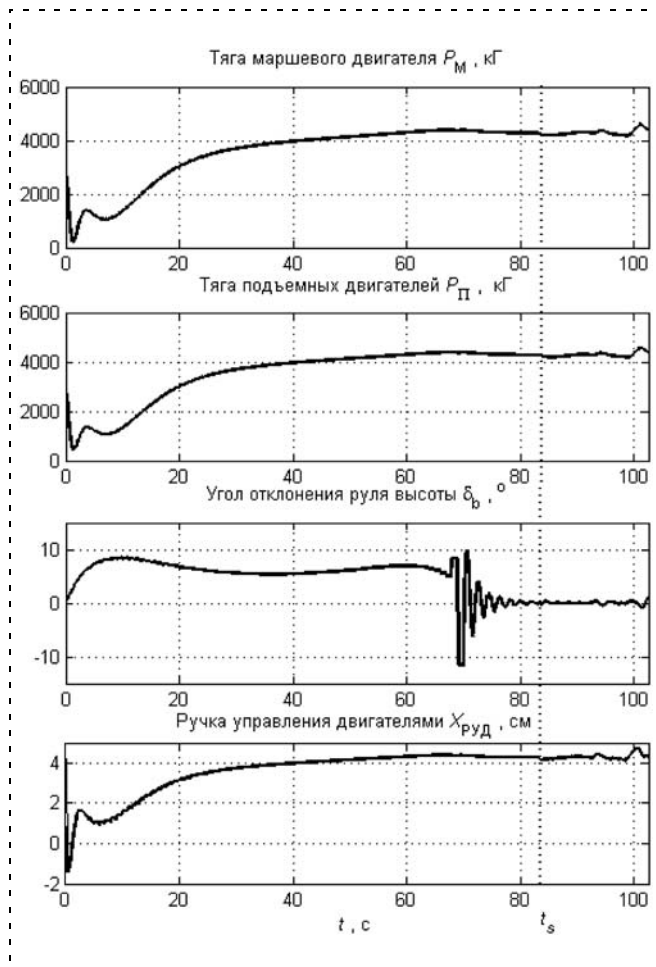


Рис. 2. Параметры управления ЛАВТ в процессе посадки при  $\tau = 19,5$  с

$G_{\Pi} = (0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ . Здесь процесс качки формируется с помощью модели (11) из "белого шума"  $v$ .

Для проверки подсистемы снижения и дискретного алгоритма выбора "окна посадки" используем их при моделировании всей автоматической системы посадки. При этом будем использовать непрерывную модель продольного движения ЛАВТ, представленную в первой части статьи (формула (1)).

Ниже приведены результаты моделирования вышеописанной системы при различных параметрах качки ПП. Варьировались параметры, определяющие работу алгоритма поиска "окна посадки" и наведения ЛАВТ на ПП в подсистеме снижения, а именно  $\tau$  — длительность интервала наведения;  $J_{1min}$  — локальный минимум (10).

На рис. 1 изображены осциллограммы расстояния от ЛАВТ до точки посадки, вертикального перемещения ЛАВТ и ПП, вертикальной относительной скорости ЛАВТ и угла вращения ЛАВТ относительно его центра масс в продольной плоскости. Из рис. 1 видно, что данный способ управления обеспечивает устойчивое "висение" ЛАВТ. Данной реализации соответствуют следующие параметры

посадки: момент окончания приведения по дальности  $t_f = 70$  с, момент начала вертикального наведения  $t_s = 83$  с; длительность интервала вертикального наведения  $\tau = 19,5$  с; ошибка вертикального наведения  $dY \approx 0,1$  м; относительная вертикальная скорость ЛАВТ в момент касания с ПП  $dV_Y \approx 0,65$  м/с; горизонтальная дальность ЛАВТ до ПП  $D \approx 0,1$  м.

На рис. 2 изображены параметры управления ЛАВТ в процессе посадки, пунктирной вертикальной линией показана граница фазы торможения и фазы снижения. Видно, что при переходе ЛАВТ от одной фазы посадки к другой нет резкого изменения в динамике параметров управления.

Надо сказать, что при таком выборе длительности интервала снижения  $\tau = 19,5$  с значение составляющей критерия (6), учитывающей ошибку прогноза, равно  $\hat{J}_2 = 188,38$ , в то время как составляющая  $\hat{J}_1$  не более 5, что существенно меньше. Тем не менее, точность вертикального приведения оказалась удовлетворительной.

Теперь посмотрим, как покажет себя система при уменьшении времени упреждения. Параметры

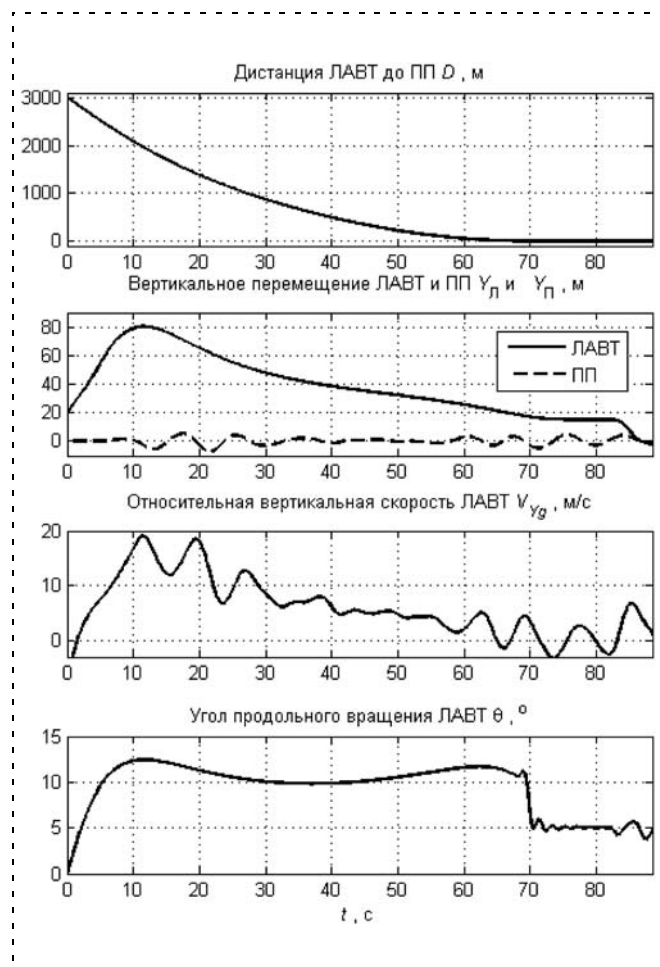


Рис. 3. Результат моделирования системы посадки ЛАВТ при  $\tau = 7$  с

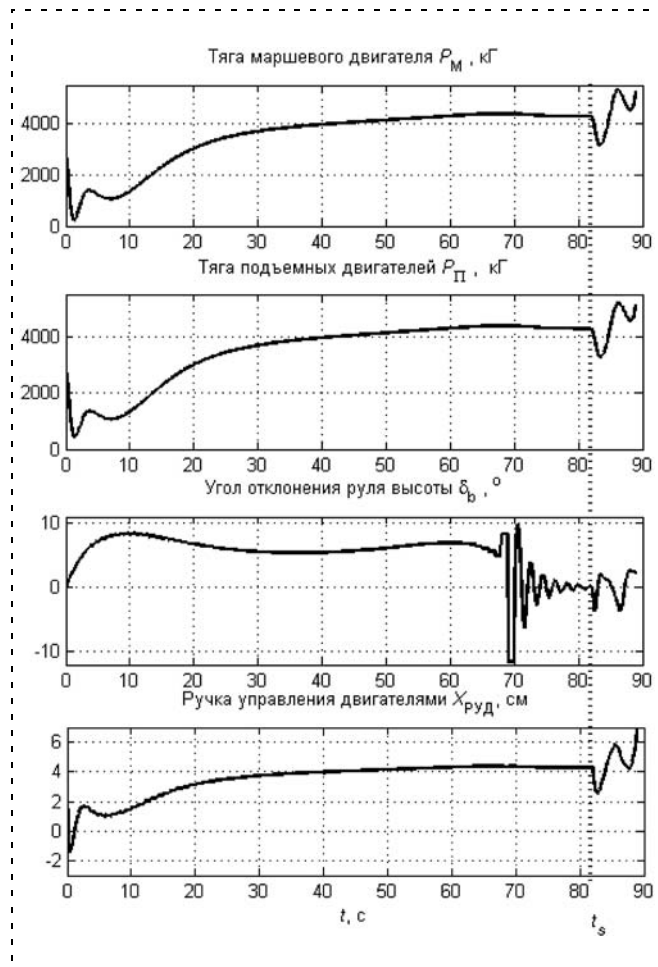


Рис. 4. Параметры управления ЛАВТ в процессе посадки при  $\tau = 7$  с

посадки ЛАВТ: момент окончания приведения по дальности  $t_f = 70$  с, момент начала вертикального наведения  $t_s = 82$  с; длительность интервала вертикального наведения  $\tau = 7$  с; ошибка вертикального наведения  $dY \approx 0,12$  м; относительная вертикальная скорость ЛАВТ в момент касания с ПП  $dV_Y \approx 0,6$  м/с; горизонтальная дальность ЛАВТ до ПП  $D \approx 0,1$  м (рис. 3).

Надо сказать, что при таком выборе длительности интервала снижения  $\tau = 7$  с значение составляющей критерия (6), учитывающей ошибку прогноза, равно  $\hat{J}_2 \approx 90$ , составляющая  $\hat{J}_1$  в этом случае уже лежит в пределах от 10 до 200. Ясно, что с уменьшением интервала  $\tau$  слагаемое  $\hat{J}_2$  уменьшается, но при этом начинает существенно расти величина  $\hat{J}_1$ . Это связано с увеличением интенсивности управления при уменьшении времени упреждения. Потому выбор длительности интервала снижения должен быть компромиссным решением между требованием к точности наведения и требованием к точности прогноза качки ПП.

На рис. 4 показаны характеристики параметров управления всей системы при  $\tau = 7$  с.

### Заключение

Результаты моделирования показали, что использование дискретных алгоритмов управления позволяет обойти ряд трудностей, связанных с особенностью непрерывных систем в терминальной точке.

Использование дискретных укороченных моделей на основе сингулярно возмущенного представления исходной системы позволяет существенно уменьшить затраты вычислительных ресурсов бортовой САУ. Построенные таким образом субоптимальные регуляторы вместе с простотой реализации обладают и высокой эффективностью, которая подтверждается результатами математического моделирования, в том числе с использованием нелинейных моделей.

Также стоит заметить, что методы, примененные в данной работе, имеют достаточно общий характер и могут быть использованы при проектировании систем управления аппаратами различных конструкций, в том числе и отличных от рассмотренного.

### Список литературы

1. Нечаев Ю. И., Петров О. Н. Обработка измерительной информации в интеллектуальных системах посадки летательных аппаратов корабельного базирования // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 8. С. 12—18.
2. Ogata K. Discrete-time control system / K. Ogata. New Jersey: Upper Saddle River, 1994. 745 p.
3. Дубовик С. А. Построение алгоритмов управления вертикальной посадкой на основе гиперболических робастных LQ-регуляторов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 8. С. 73—84.
4. Кабанов А. А., Дубовик С. А. Синтез управления посадкой летательного аппарата с вращающимся вектором тяги // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 2. С. 41—48.
5. Дубовик С. А. Математические проблемы синтеза систем управления посадкой летательных аппаратов корабельного базирования // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 8. С. 27—37.

ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках

**4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)**

состоится научно-техническая конференция

**"МЕХАТРОНИКА И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (МЭС-2011)**

Научные направления конференции:

- ♦ **АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ**  
Руководители: член-корр. РАН Е. Д. Теряев, д. т. н., проф. Н. Б. Филимонов
- ♦ **АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**  
Руководители: член-корр. РАН Г. Г. Себряков, д. пс. н., проф. С. Ф. Сергеев
- ♦ **ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**  
Руководители: д. т. н., проф. Ю. В. Подураев, д. т. н., проф. А. С. Ющенко
- ♦ **ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**  
Руководители: член-корр. РАН А. Ф. Резчиков, д. т. н., проф. В. Ф. Коростелев

Подробная информация о мультikonференции МКПУ-2011 и условиях участия в ней размещается на сайте: <http://www.mvs.tsure.ru>

# CONTENTS

**Zaytseva M. V., Parsheva E. A.** Robust Control of a Linear Plant in the Case Disturbance and Noise . . . . . 2

*The problem of designing the robust control systems of linear stationary object that allow to compensate disturbances and noise using indirect measurements is solved. Operability and availability of the control system is proved in the case of non-measurable and unlimited disturbance. The main results are obtained using the method of embedded systems and the auxiliary contour method. Example and results of the computer simulation illustrate the operability of the proposed control system.*

**Keywords:** invariant systems, method of embedded systems, zero divider, canonization of matrices, auxiliary contour method.

**Kolobashkina L. V., Alyushin M. V., Alyushin V. M.** The Synthesis of the Optimal Correction Laws for the High Dimension Weekly Damped Systems . . . . . 7

*This article is devoted to the digital correction laws synthesis of the liquid elastic rocket considering the object dynamics as a solid body, the liquid fuel vibrations in two tanks and the five vibration modes of the elastic enclosure. During the design of weekly damped high dimension object control systems great attention is paid to the selection of the reconfigurable corrective devices, which provide the required phase and amplitude stability resources and guarantee the closed system functioning under the object parameters variation in different modes of operation.*

**Keywords:** weekly damped system, quadratic functional, optimal control, dynamic programming, Riccati equation.

**Artemova S. V., Gribkov A. N.** Algorithmization for Synthesis of Heat Technological Devices Control Based on Integrated Count . . . . . 15

*Approach to algorithmization for synthesis of heat technological devices control based on integrated count was proposed in this article. Main peculiarities of heat technological devices as object control was considered, problem statements of algorithmization for control synthesis and examples of their solutions was adducted.*

**Keywords:** algorithmization for synthesis, integrated count, heat technological device, set of functioning states.

**Tarasov E. N.** Centralized Control of Automated Informational System . . . . . 23

*There were considered the main points of centralized control organization of automated informational system with specific demands. There were shown resources of realization such a control.*

**Keywords:** automated informational system, centralized control, control parameters, control directive, system administrator.

**Cheburakhin I. F., Tsurkov V. I.** Syntheses Discrete Logical Device Information Handling on Base of the Theories Agent . . . . . 27

*It is offered software and hardware realized processing logical to information for automated information controlling systems. The Particularity of the approach is a development algorithm for indirect calculation method of the free boolean function in miscellaneous base, founding on decompositions, categorizations ensemble boolean function and coding. They Are Defined methods to minimization of the programs on count; calculate; list performed instruction (time of the functioning the programs), which are taken into account in the main algorithm. The Other particularity of the approach is a directivity on possible multisequencing of the calculations. The Algorithms corresponding to image are converted, relieving hereinafter programming for systems with much nucleus processors.*

**Keywords:** information multiagent of the system and technologies; much nucleus processors; boolean function; syntheses formula and circuit; decomposition; difficulty; factors quality; minimization; coding.

**Osipov V. Yu.** Optimization of Associative Intelligent Systems . . . . . 35

*An approach to optimization of associative Intelligent Systems (AIS). Introduced indicator of their associative performance. According to this indicator investigated the benefits of a number of logical structures within the AIS bilayer recurrent neural networks with managed synapses. The results of mathematical modeling. Practical recommendations for the use of the proposed approach and effectiveness of AIS.*

**Keywords:** the associative intelligent system, neural network, structure, optimization.

**Gorodetsky V. I., Bukhvalov O. L.** Multi-Agent Self-Organized GRID Resource Management . . . . . 40

*The paper proposes a model for distributed GRID resource real time self-organized management implemented using P2P multi-agent architecture. In this model, management task is solved using only simple local interactions of neighbor agents set up on top of FIPA compliant distributed P2P agent platform. The paper describes self-organization mechanism, GRID resource management system architecture and developed software prototype. The software prototyping uses several software tools developed in Intelligent System Lab. of SPIIRAN. In particular, it uses distributed P2P agent platform, tool for emulation of distributed P2P communication environment, generator of networks of a predefined topology and some others.*

**Keywords:** self-organization, multi-agent systems, GRID, resource management, P2P agent platform.

**Kruglova T. N.** Intellectual Method of Diagnosing and Forecasting of a Technical Condition of the Mechatronic Complexes for Extreme Conditions . . . . . 47

*The method of diagnosing and forecasting of a technical condition of the mechatronic complexes, which use fuzzy-logic and neural network. Method possibilities are illustrated by an example of diagnosing and forecasting of a technical condition of the module of movement of the mine fan. Results of an estimation of reliability and efficiency of the offered method are presents.*

**Keywords:** neuro-fuzzy method of diagnosis, neural network method of forecasting, intelligent method of diagnosis and forecasting.

**Shprekher D. M.** Neural Optimizational Models Trouble-Shooting the Electromechanic Systems. . . . . 51

*Using displays of two-dimensional distribution of checks of electromechanical systems in space of time parameters on an one-dimensional ring route of their following are presented of neural networks. In model of Hop-field's neural net the program of elementary checks is coded by activity neurons between which communications steal up so that energy of a network has appeared connected with total time of search.*

**Keywords:** the electromechanic systems, troubleshooting, nejrosetevaya model.

**Aliyev E. N.** Monitoring and Diagnostics System of Load-Bearing Structure Statuses in Construction Activity . . 55

*In this article considering the noncontact method of monitoring and diagnostics of load-bearing structure of statuses. Offered ways of digital processing of acoustics signals. On the base of experimental research are given comparative analysis of results. Offered the intelligent system of monitoring and diagnostics system statuses of load-bearing structure.*

**Keywords:** technical diagnostics, monitoring, recognition, prediction, acoustics, ultrasound, diagnostic characters, identification.

**Nagar Yu. N., Olshanskiy V. Yu., Pankratov V. M.** A Piezogyroscope Dynamics at Work in Trigger Mode. . . . . 63

*There has been considered a model of piezogyroscope consisting of two orthogonal piezoplates and a mass associated to them. The alternating current that affects the first plate causes the elastic waves in it and the fluctuation of the associated mass. With the device's portable rotation Coriolis forces affecting the associated mass produce the alternating pressure onto the second plate. Using the Laplace transform, the solution of the boundary problem describing the plane deformation waves propagation was obtained. There was found the dependence of the amplitude on time and the time of going on the steady state of the forced fluctuations was determined.*

**Keywords:** coriolis force, piezoeffect, deformation waves, Laplace transform.

**Kolesnichenko S. V.** Substantiation of Systems Navigation and Time Securing for Guidance Systems of High-Accuracy and High-Dynamic Aircraft . . . . . 67

*The article reflects some main problems of substantiation and working out high-accuracy systems of navigation and time securing for high-dynamic aircraft. The author proposes conceptual, circuit, technical and constructive solutions to increase the possibilities of the flight control systems by means of using the factors of alternative navigational systems.*

**Keywords:** control system, complexation, alternative navigational systems, airborne system adjusting, accuracy of parameterization, efficiency.

**Kabanov A. A.** Automatic Landing System of Ship Basing Aircraft. Part 2. Vertical Decline Subsystem . . . . . 74

*This part of the article is sanctified to the finishing phase of the automatic landing of vectored-thrust aircraft. Questions, related to the construction of decline subsystem, providing the vertical coercion of aircraft on relative descriptions of motion up to a touch with landing ground of the ship, are here examined.*

**Keywords:** aircraft, landing system, terminal control, wave disturbances, perturbation method.

---

---

**Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

---

Сдано в набор 30.12.2010. Подписано в печать 16.03.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 11,16. Заказ 135. Цена договорная.

---

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15