

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 12 (141)

декабрь

2012

Редакционный совет:

ВАСИЛЬЕВ С. Н.
КАЛЯЕВ И. А.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗНЕЦОВ Н. А.
ЛЕОНОВ Г. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
МИКРИН Е. А.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.
ЧЕНЦОВ А. Г.
ШЕРБАТЮК А. Ф.
ЮСУПОВ Р. М.

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БУКОВ В. Н.
ВИТТИХ В. А.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
СЕРГЕЕВ С. Ф.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФРАДКОВ А. Л.
ФУРСОВ В. А.
ЮРЕВИЧ Е. И.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Метод динамической коррекции и автономизация каналов управления в многосвязных системах на основе формализма линейно-квадратичной оптимизации. 2
- Чебурахин И. Ф.** Алгоритмизация представления булевых функций формулами и схемами минимальной сложности в базе Жегалкина 7

КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМАХ

- Алиев Т. А., Алиев Э. Р., Ализаде Т. А.** Технологии помехомониторинга скрытого периода изменения сейсмостойкости морских сооружений. 15
- Оруджов Г. Г., Алиева А. А., Расулова Н. В.** Система автоматического управления объемом воды в водохранилище с применением элементов ГИС-технологий. 22

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Айвазян С. А.** Алгоритм системы автоматизированного визирования и сопровождения объектов (целей) с использованием информации о направлении взгляда человека-оператора. 27
- Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э.** Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 3. Системный администратор 32

БИОМЕХАТРОНИКА

- Гришин А. А., Герасименко Ю. П., Мошонкина Т. Р., Павловский В. Е., Платонов А. К., Сербенюк Н. С.** Биомехатроника и лечебно-исследовательские тренажеры. Концептуальные и медико-биологические основы 37
- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Биомехатроника в медицинской роботехнике 45

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Хахулин Г. Ф., Малыгин В. Б.** Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов 50
- Быстров Л. Г., Попов А. А., Тетерин Д. П.** Методика оценки работоспособности элементов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях произвольных входных возмущающих воздействий. 56
- Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Динамические температурные погрешности в каналах термодатчиков семейств градуировочных характеристик системы измерения с кластерами одноразовых вихретоковых датчиков 62
- Указатель** статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2012 году 65
- Contents** 71

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

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

УДК 62-50:681.5.01

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф.,
filimon_ab@mail.ru,

Московский государственный университет
приборостроения и информатики,

Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф.,
nbfilimonov@mail.ru,

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Метод динамической коррекции и автономизация каналов управления в многосвязных системах на основе формализма линейно-квадратичной оптимизации*

Предлагается аппроксимационный метод динамической коррекции линейных многоканальных управляемых объектов. Желаемый результат коррекции представлен эталонной динамической моделью. Применяемый математический аппарат основан на формализме ЛК-оптимизации. Решается задача динамической развязки каналов управления.

Ключевые слова: динамическая коррекция многоканальных объектов, аппроксимация, эталонная динамическая модель, формализм линейно-квадратичной оптимизации, динамическая развязка каналов управления

"Центральным вопросом теории синтеза оптимальных систем следует считать эффективное построение корректирующих управлений... Трудности исследования многомерных систем зависят от сложных взаимодействий друг с другом их составных элементов. В общем случае решить такую проблему нельзя. Однако, в конкретных ситуациях путем специальных математических приемов, преобразований иногда удается расщепить сложную составную систему".

Н. Н. Моисеев

Введение

Один из базовых принципов синтеза систем автоматического управления (САУ) заключается в динамической коррекции объектов управления, посредством чего упрощается разработка алгоритмов управления.

* Работа выполнена в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (грант № 12-08-00304-а).

Традиционным методам синтеза САУ на основе формализма линейно-квадратичной (ЛК) оптимизации (именуемым также задачами АКОР — аналитического конструирования оптимальных регуляторов) априори присущ принципиальный недостаток: в них выхолащивается ключевая для инженерной практики проблема динамического качества процессов управления [1]. В работе [2] предложен альтернативный способ применения ЛК-формализма к задачам синтеза САУ, лишенный данного недостатка. В его основе лежит оптимизационная схема динамической коррекции объектов управления: желаемое качество синтезируемой системы постулируется в виде заданной эталонной модели скорректированного объекта, а оптимизируемые интегральные квадратичные функционалы служат лишь мерой отклонения формируемых переходных характеристик каналов управления от эталонных значений. Данный подход фактически обеспечивает конвергенцию классической концепции прямых показателей динамического качества систем и формализма ЛК-оптимизации.

Разработанный авторами метод динамической коррекции [2, 3] охватывает класс линейных стационарных объектов управления с одномерными входом и выходом. В данной работе этот метод распространяется на многосвязные объекты управления. На его основе также решается задача динамической развязки каналов управления.

Следует заметить, что концепция эталонной модели управляемых процессов (желаемой динамики состояния или выхода объекта) применяется в задачах ЛК-оптимального отслеживания задающих воздействий (см., например, [4, с. 379—382; 5, с. 483—484; 6, с. 240—242; 7, с. 704—705]). Здесь эталонная модель является генератором задающих воздействий, а интегральные квадратичные функционалы служат мерой близости действительного и желаемого (эталонного) движений системы.

Уточним ряд терминов, которые будут далее использоваться.

Под каналом "вход-выход" системы понимается динамическая связь (зависимость) между ее входной и выходной переменными. Для каналов управления вход является управляющим, а выход — управляемым. Канал в случае скалярности его входа и выхода является одномерным, в противном случае — многомерным. В многоканальной системе имеются несколько каналов "вход-выход". Система называется *многосвязной*, если некоторые ее каналы динамически связаны, т. е. подвержены взаимодействию. Свойство *сепаратности* каналов означает их полную независимость.

Аппроксимационная схема динамической коррекции объектов управления

Полагаем, что объект управления относится к классу линейных стационарных динамических систем и описывается уравнениями вида

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad (1)$$

$$y = Cx, \quad (2)$$

где $t \in [0, \infty)$, $u \in \mathbf{R}^r$ — управляющий вход, $x \in \mathbf{R}^n$ — состояние, $y \in \mathbf{R}^m$ — управляемый выход объекта; $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbf{R}^{n \times r}$, $C \in \mathbf{R}^{m \times n}$.

Передаточная матрица объекта по каналам "вход-выход" в соответствии с (1) и (2) равна

$$W(s) = C(E_n s - A)^{-1} B, \quad (3)$$

где s — комплексная частота, E_n — единичная матрица n -го порядка.

Далее будем полагать, что

$$1 < m \leq r. \quad (4)$$

Концепцию динамической коррекции воплощает блок-схема САУ, представленная на рис. 1.

Здесь управляющее устройство (УУ) состоит из двух блоков: *блока коррекции* (БК), формирующего желаемые динамические характеристики каналам управления, и *блока управления* (БУ), реализующего закон управления для скорректированного объекта.

Пусть эталонная модель динамики скорректированного объекта задана в виде некоторой системы n_M -го порядка:

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M v; \quad (5)$$

$$y_M = C_M x_M, \quad (6)$$

где $v \in \mathbf{R}^r$ — вход, $x_M \in \mathbf{R}^{n_M}$ — состояние, $y_M \in \mathbf{R}^m$ — выход эталонной модели; A_M , B_M , C_M — числовые матрицы соответствующих размеров.

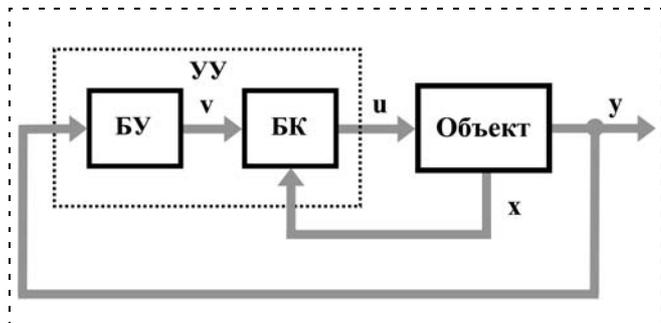


Рис. 1

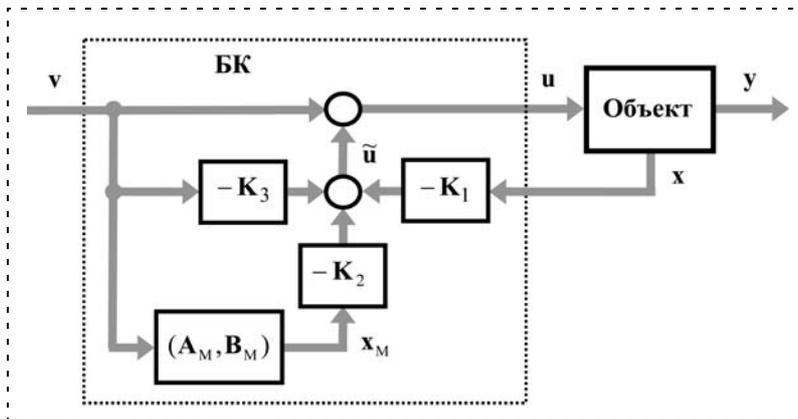


Рис. 2

Будем сравнивать реакции скорректированного объекта и эталонной модели на приложенное постоянное воздействие

$$v(t) = v(0) \neq 0 \quad (t > 0). \quad (7)$$

Результатом коррекции должны быть близкие выходные сигналы данных систем:

$$y(t) \approx y_M(t). \quad (8)$$

Расхождение между ними выражает *невязка*

$$\Delta y(t) = y(t) - y_M(t). \quad (9)$$

Для оценки невязки воспользуемся интегральным квадратичным функционалом

$$\int_0^{\infty} \|\Delta y(t)\|^2 dt \quad (10)$$

(двойные прямые скобки $\|\dots\|$ обозначают евклидову норму вектора).

Структурно-параметрический синтез БК направлен на минимизацию критерия (10), так что рассматриваемый тип коррекции по своему смыслу является *аппроксимационным*.

Предлагаемую структуру БК отражает рис. 2. Она включает динамическое звено, которое представляет уравнение состояния (5) эталонной модели и обозначено парой (A_M, B_M) .

Функционирование БК подчиняется уравнениям

$$u = v + \tilde{u}; \quad (11)$$

$$\tilde{u} = \tilde{u}_1 + \tilde{u}_2 + \tilde{u}_3; \quad (12)$$

$$\tilde{u}_1 = -K_1 x; \quad (13)$$

$$\tilde{u}_2 = -K_2 x_M; \quad (14)$$

$$\tilde{u}_3 = -K_3 v. \quad (15)$$

Здесь $K_1 \in \mathbf{R}^{r \times n}$, $K_2 \in \mathbf{R}^{r \times n_M}$, $K_3 \in \mathbf{R}^{r \times r}$ — матричные настроечные параметры БК.

Компенсационная схема расчета блока коррекции

Идея настройки параметров блока коррекции заключается в применении *компенсационной схемы* (КС), изображенной на рис. 3. Она включает четыре компонента: точную копию (модель) объекта управления, модель блока коррекции, задатчик (3), генерирующий тестовый сигнал $\mathbf{v}(t)$, и цепь сравнения, формирующую невязку $\Delta \hat{\mathbf{y}}(t)$ — сигнал согласования выходов модели объекта $\hat{\mathbf{y}}(t)$ и эталона $\mathbf{y}_M(t)$:

$$\Delta \hat{\mathbf{y}}(t) = \hat{\mathbf{y}}(t) - \mathbf{y}_M(t). \quad (16)$$

КС описываются уравнениями

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}(\tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{v}); \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{v}; \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = -\gamma \mathbf{v}; \quad (19)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{C}_M \mathbf{x}_M, \quad (20)$$

причем ее динамический порядок равен

$$\tilde{n} = n + n_M + r.$$

Подчеркнем, что переменная \mathbf{v} входит в состав эндогенных переменных КС.

Полагаем

$$0 < \gamma \ll 1. \quad (21)$$

Согласно (19) тестовый сигнал $\mathbf{v}(t)$ является экспоненциальным

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(0) \exp(-\gamma t), \quad (22)$$

причем, в силу (21), *слабозатухающим*.

Сформируем вектор состояния системы (17)–(20):

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{x}_M \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Тогда уравнения КС можно записать в векторно-матричной форме:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{u}}, \quad (24)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{x}}. \quad (25)$$

Здесь матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$ и $\tilde{\mathbf{C}}$ имеют следующую блочную структуру:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_M & \mathbf{B}_M \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\gamma \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad -\mathbf{C}_M \quad \mathbf{0}].$$

Параметрический синтез БК сводится к ЛК-оптимизации процессов в КС с управляющим входом $\tilde{\mathbf{u}}$.

Базовая ЛК-задача оптимизации процессов в компенсационной схеме

Обратимся к оптимизационной задаче для КС ($g > 0$):

$$\int_0^{\infty} [g \|\Delta \hat{\mathbf{y}}(t)\|^2 + \|\tilde{\mathbf{u}}(t)\|^2] dt \rightarrow \min. \quad (26)$$

Принципиальное значение имеет следующее свойство решений рассматриваемой ЛК-задачи: если объект (1), (2) вполне управляем и наблюдаем, его передаточная матрица (3) имеет полный ранг и выполняется условие (4), то посредством выбора больших значений весового коэффициента в (26):

$$g \gg 1, \quad (27)$$

невязку $\Delta \hat{\mathbf{y}}(t)$ *возможно сделать сколь угодно малой* в смысле метрики функционального пространства $L_2[0, \infty)$. Но это согласно (16) будет означать близость в этой же метрике сигналов $\hat{\mathbf{y}}(t)$ и $\mathbf{y}_M(t)$:

$$\hat{\mathbf{y}}(t) \approx \mathbf{y}_M(t). \quad (28)$$

Решение ЛК-задачи (24)–(26) дает линейный закон регулирования

$$\tilde{\mathbf{u}} = -\tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (29)$$

$$\tilde{\mathbf{K}} = \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P},$$

где $(^T)$ — символ транспонирования), а $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{\tilde{n} \times \tilde{n}}$ — симметрическая матрица, являющаяся решением алгебраического матричного уравнения Риккати

$$\mathbf{P} \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} - g \tilde{\mathbf{C}}^T \tilde{\mathbf{C}} = 0. \quad (30)$$

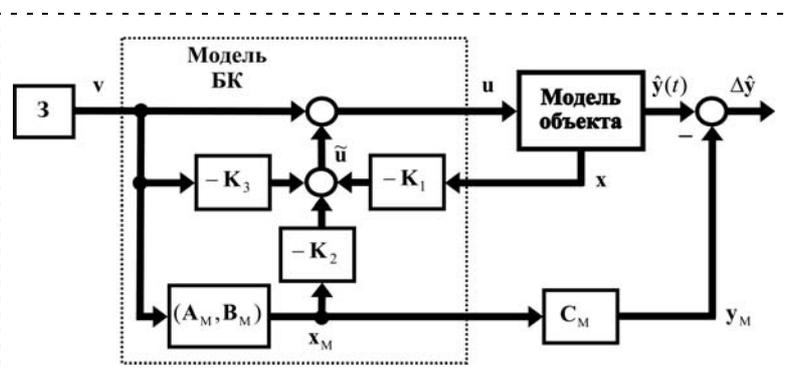


Рис. 3

Разбивая матрицу $\tilde{\mathbf{K}}$ согласно (23) на блоки размеров $r \times n$, $r \times n_m$ и $r \times r$:

$$\tilde{\mathbf{K}} = [\mathbf{K}_1 \mid \mathbf{K}_2 \mid \mathbf{K}_3], \quad (31)$$

получим искомые матричные параметры \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 и \mathbf{K}_3 блока коррекции (11)—(15).

Отметим, что требуемый результат коррекции (8) вытекает из (28) вследствие идентичности цепей преобразования сигнала $\mathbf{v}(t)$ в сигналы $\mathbf{y}(t)$ и $\hat{\mathbf{y}}(t)$ в схемах на рис. 2 и 3, так что при совпадении начальных состояний объекта и его модели будет выполняться равенство

$$\mathbf{y}(t) = \hat{\mathbf{y}}(t).$$

Отсюда же и из (9), (16) следует, что значение оптимизируемого функционала (26) в условиях его параметризации (27) будет определять значение критерия качества коррекции (10).

Поясним смысл введения затухающего тестового воздействия (22) вместо постоянного (7). Оно обусловлено требованием сходимости функционала в (26) и мотивируется тем, что в случае достаточно малого параметра затухания γ мы получим *квазистационарный* сигнал $\mathbf{v}(t)$, который практически будет совпадать с постоянным сигналом (7) в течение времени установления переходных процессов в КС.

Замечание. Традиционные методы ЛК-оптимизации (АКОР) рассчитаны на задачи стабилизации и поэтому ограничивают структуру конструируемых законов управления обратной связью по состоянию. Поскольку ЛК-регуляторы не предназначены для режимов отслеживания командных сигналов (т. е. на процессы регулирования с изменяющейся уставкой), то по своим функциональным возможностям они уступают классическим схемам САУ, включающим корректирующие звенья трех типов: последовательные, параллельные и встречно-параллельные [8, 9]. Предлагаемая схема коррекции имеет более сложную структуру по сравнению с теми и другими, что продиктовано ее функциональным назначением.

Задача динамической развязки каналов управления

САУ многосвязных объектов имеет несколько контуров управления, и для многих инженерных приложений актуальной является задача их *автономизации*, т. е. достижение автономности (независимости) процессов управления в различных контурах посредством системотехнических методов и средств. Решение данной задачи возможно основывать на механизме *динамической развязки*: формировании новых несвязанных или же слабо связанных каналов управления, на которые и будут замыкаться синтезируемые контуры автономного управления.

Динамическую развязку, в свою очередь, правомерно рассматривать как особый тип динамической коррекции многоканальных объектов и использовать разработанный метод многоканальной коррекции —

достаточно выбрать подходящую эталонную модель с сепаратными каналами управления.

Передаточная матрица эталонной модели по каналам "вход-выход" в соответствии с (5) и (6) равна

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}_M(\mathbf{E}_{n_m} s - \mathbf{A}_M)^{-1} \mathbf{B}_M.$$

Варианту одномерных сепаратных каналов отвечает диагональная передаточная матрица

$$\mathbf{G}(s) = \text{diag}(G_1(s), G_2(s), \dots, G_m(s)),$$

где $G_i(s)$ ($i = \overline{1, m}$) — передаточные функции каналов. В случае "квадратного" объекта, т. е. при $r = m$, входами сепаратных каналов являются переменные v_i , $i = \overline{1, m}$.

Пример. Параметры объекта: $n = 4$, $r = m = 2$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & -2 & 1 \\ 0 & -2 & -3 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 1 \\ -1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Эталонную модель зададим диагональной передаточной матрицей

$$\mathbf{G}(s) = \text{diag}\left(\frac{1}{s+1}, \frac{1}{2s+1}\right). \quad (33)$$

Ей отвечают следующие коэффициентные матрицы уравнений (5), (6):

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -0,5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для получения желаемой статики в скорректированном объекте в каналы управления включим интеграторы, которые опишем уравнениями

$$\dot{x}_5 = u_1 \text{ и } \dot{x}_6 = u_2. \quad (34)$$

Здесь x_5 и x_6 — выходы интеграторов, u_1 , u_2 — их входы. В итоге мы получим расширение состава переменных состояния объекта и соответствующее изменение его коэффициентных матриц (32) с учетом уравнений (34).

Для компенсационной схемы (17)—(20) примем $\gamma = 0,01$, а в функционале (26) положим $g = 100$. Решение уравнения (30) и соотношения (29), (31) дают следующие параметры БК:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0,61 & 0,94 & -1,05 & -1,16 & 1,41 & -0,33 \\ 18,75 & -2,47 & 2,58 & 7,13 & -0,33 & 9,72 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0,46 & -4,13 \\ -7,93 & 0,89 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 0,34 & -5,79 \\ -2,06 & 0,33 \end{bmatrix}.$$

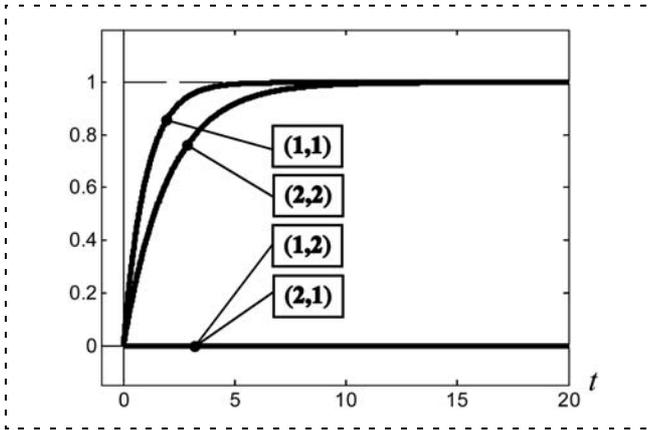


Рис. 4

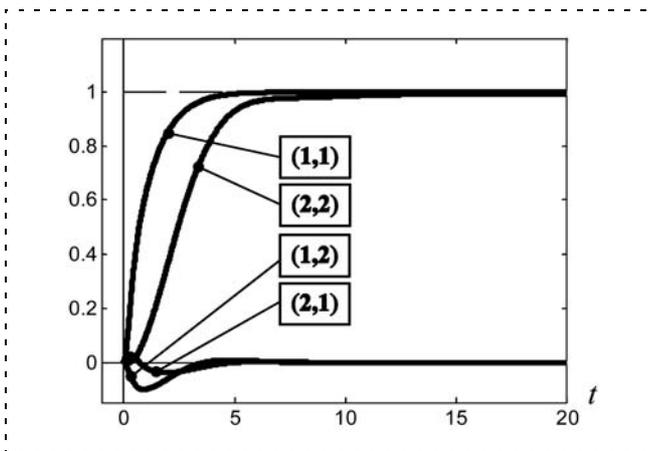


Рис. 5

Вычисление спектра полюсов скорректированного объекта дает

$$\Lambda = \{-0,5; -1,0; -1,47; -4,54 \pm 5,12i; -0,61 \pm 0,73i; -6,35\}.$$

Отметим, что здесь первые два полюса являются доминирующими и совпадают с полюсами передаточной матрицы (33).

На рис. 4 и 5 представлены переходные характеристики (ПХ) эталонной модели и скорректированного объекта по всем четырем скалярным каналам "вход-выход" (на графиках пары (i, j) обозначают каналы, связывающие i -й вход объекта с его j -м выходом).

Видно, что ПХ скорректированного объекта мало отличается от эталонных значений, т. е. достигну-

тая развязка каналов управления близка к идеальной. Отметим также, что эффективность описанной схемы динамической развязки подтверждают также и другие модельные примеры.

Заключение

Предлагаемый метод многоканальной динамической коррекции является аппроксимационным и базируется на аппарате задач ЛК-оптимизации. Коррекция направлена на приближение скорректированной динамики объекта к эталонной модели, которая может быть подобрана исходя из соображений простоты построения алгоритмов управления. Предложенная схема динамической коррекции может представлять интерес не только для задач регулирования. В частности, она применима к задачам программного и терминального управления.

Отметим методологический аспект полученных результатов — они указывают на принципиальную возможность конвергенции классической концепции динамического качества процессов регулирования и аппарата АКОР.

Список литературы

1. Филимонов Н. Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 2–11.
2. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Динамическая коррекция процессов регулирования методом линейно-квадратической оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 9–16.
3. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Аппроксимационная формализация обратных задач динамики в процессах управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Междунар. конф. / Под ред. Е. А. Федосова, Н. А. Кузнецова, В. А. Виттиха. Самара: Самарский НЦ РАН, 2012. С. 546–549.
4. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
5. Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. Т. I–4. Автоматическое управление. Теория / Е. А. Федосов, А. А. Красовский, Е. П. Попов и др. Под общ. ред. Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000.
6. Современная прикладная теория управления. В 3-х ч. Ч. I. Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 т. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
8. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). М.: Машиностроение, 1982.
9. Солодовников В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987.

И. Ф. Чебурахин, д-р техн. наук, проф.,
cybernetics@mati.ru,
МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского

Алгоритмизация представления булевых функций формулами и схемами минимальной сложности в базисе Жегалкина*

Предлагаются алгоритмы синтеза булевых (логических) формул в базисе Жегалкина и получения при этом эффективных оценок сложности (по числу букв, базисных функций и других). Также предложена оригинальная классификация множества булевых функций, позволяющая выводить некоторые счетные их классы на основе функциональных уравнений и подсчитывать мощность этих классов. При этом методы позволяют проводить эффективный синтез схем из функциональных элементов.

Ключевые слова: булевы функции и их классификация, базис Жегалкина, меры сложности, минимизация, декомпозиция, синтез, функциональные уравнения, схема

Введение. Статья посвящена изучению вопросов реализации булевых функций (БФ) в разных базисах (в классах формул или схем из функциональных элементов — ФЭ). Проводимые исследования в этой области показывают, что получение оптимального решения неизбежно предполагает использование алгоритмов переборного характера. Следствием этого является большая трудоемкость поиска такого решения, граничащая с невозможностью его получения уже для функций небольшой размерности. Это приводит к разработке новых подходов постановки задачи и ее решения, заметно отличающихся по трудоемкости от переборных [1–6].

Используемые обозначения [7–9]: $[x]$ для приближения чисел с избытком (наименьшее целое, не меньше числа x); следующие логические операции обозначаются двумя способами: конъюнкция как "&" или "·" (точка — знак умножения может также применяться для обозначения арифметического умножения); C_n^i — число всех различных i -подмножеств из элементов данного n -множества. *Некоторые понятия и обозначения действуют в рамках примера или даже одной формулы. Известные факты и иллюстрационные (обучающие) примеры печатаются мелким шрифтом.*

1. Булевы функции, базисы, формулы и схемы из ФЭ, показатели сложности. Пусть f (или $f^{(n)}$) — булева функция (БФ), зависящая от n существенных переменных из множества $X = \{x_1, \dots, x_n\}$. Под базисом G понимаем конечную функционально полную систему булевых функций, в частности, базис Жегалкина $G_3 = \{\&, \oplus, 0, 1\}$ для всех БФ. Счи-

таем, что функция $f^{(n)}$ задается скобочной формулой $F^{(n)}$ (или полиномом) в базисе G_3 .

При представлении БФ $f^{(n)}$ суперпозиционной формулой $F_{с.ф}^{(n)}$ в базисе G применяются конструктивные операции из некоторого их множества, они поясняются, поэтому ниже ограничиваемся только их указанием. В качестве меры сложности представления функции f формулой F или схемой S определяем соответствующие показатели (дискретные функционалы): $L_B(f, G)$ — суммарное число вхождений символов переменных в формулу F ; $L_f(f, G)$ — число базисных функций в F ; $L_S(f, G)$ — число ФЭ в схеме S .

По практическим соображениям показатели сложности (функционалы) минимизируем. При представлении булевых функций в классе формул (включая скобочные) для минимизации показателей сложности используются эквивалентные преобразования — в классе схем для минимизации числа ФЭ применяется ветвление их выходов [7–9].

Сложностью $L_S(f, G)$ функции f в классе схем из ФЭ в базисе G называется минимальная сложность схемы S среди всех схем, реализующих f .

2. Функциональные уравнения (ФУ). Рассмотрим несколько определений разных типов ФУ, относящихся к новым методам [7–9].

Пусть $g^{(2)}$ — двухместная БФ, задающая начальный член последовательности изучаемого класса функций $f^{(n)}$, $n \geq 2$, и $h^{(2)}$ — функция рекурсии. Тогда рекуррентное соотношение

$$f^{(n)} = h(f^{(n-1)}, x_n), \quad n \in N, \quad (1)$$

получаемое на основе операции суперпозиции, назовем функциональным уравнением типа 1. Аналогично определяется ФУ типа 2

$$f^{(n)} = h^{(3)}(f^{(n-2)}, x_{n-1}, x_n), \quad (2)$$

где $h^{(3)}$ — трехместная булева функция, а также другие ФУ. На основе (1) и (2) получаются также ФУ для показателей качества (ФУ_{ПК}) синтеза. Данные определения ФУ отличны от приведенных в работах [4, 5].

3. Сложность произвольной булевой функции на основе ФУ (базовый случай). Применим метод ФУ для реализации произвольной БФ $f^{(n)} \in P_2^{(n)}$ формулой $F^{(n)}$ и получения при этом верхней оценки сложности L_F (в базисе G_3). Булева функция $f^{(n)}$ зависит от переменных из множества $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ и задается полиномом Жегалкина $F^{(n)} = K_1 \oplus \dots \oplus K_m$, где K_i — монотонная элементарная конъюнкция (ЭК) ранга r_i , причем $r_1 \geq \dots \geq r_i \geq \dots \geq r_m$, $1 \leq i \leq m$. Такой полином Жегалкина называется каноническим, его ЭК расположены в соответствии с порядком "≥". Вектор $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_m)$ задает строение полинома Жегалкина. При этом определяем вектор $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$ повторяемости переменных из множества X в формуле $F^{(n)}$: переменная x_i , $1 \leq i \leq n$, повторяется в формуле $F^{(n)}$ число p_i раз.

Находим $p_i = \max(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$, $1 \leq i \leq n$. Тогда ФУ (1) имеет вид

$$F^{(n)} = ((x_i \cdot F_0^{(n-1)}) \oplus F_1^{(n-1)}), \quad (3)$$

где нижние индексы 0 и 1 — номера соответствующих остаточных функций, рассматриваемых на одном множестве $X' = X \setminus \{x_i\}$. Будем их записывать, соответственно, как $F^{(n-1), 0}$ и $F^{(n-1), 1}$.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-01-90441 УкрФ.

Применяя к $F^{(n-1), 0}$ и $F^{(n-1), 1}$ ФУ (3) и так далее, получим $F_{с.ф.}^{(n)}$. Каждое применение ФУ (3) порождает не более двух базисных функций из G_3 и не более двух остаточных функций $F^{(n-1), 0}$ и $F^{(n-1), 1}$. Используя последовательно ФУ (3) и суммируя значения сложности L_F , выводим верхнюю оценку сложности для общего случая:

$$L_F(F^{(n)}, G_3) = L_F(F^{(n-1), 0}) + L_F(F^{(n-1), 1}) + 2 = \\ = L_F(F^{(n-2), 00}) + L_F(F^{(n-2), 01}) + L_F(F^{(n-2), 10}) + \\ + L_F(F^{(n-2), 11}) + 6 = \dots = \sum_{[*]} L_F(F^{(n-j), [j]}) + 2 \cdot (2^j - 1), \quad (4)$$

где результат содержит сумму числа и выражения, которое предстоит вычислить; j — число шагов декомпозиции ($1 \leq j \leq n$); $[j]$ — последовательность символов 0 или 1, длиной j ; $[*]$ — суммирование сложностей, выполняемое для шага j , по всем остаточным функциям, число которых после каждого шага может удваиваться.

Используя теорему о полноте системы булевых функций, можно получать оценки L_F сложности функций в других базисах [3].

Заметим, что рекуррентное соотношение (3) применяется для получения суперпозиционной формулы $F_{с.ф.}^{(n)}$, а (4) — для получения соответствующей оценки сложности $L_F(F_{с.ф.}^{(n)}, G_3)$.

Преобразуя эквивалентно формулу $F^{(2)}$, всегда можно получить $L_F(F^{(2)}) \leq 3$. Если j — число шагов декомпозиции — выбрать равным $n-2$ ($j = n-2$), то из (4) для общего случая выводим явно верхнюю оценку сложности:

$$L_F(F^{(n)}, G_3) = L_F(F^{(2), 0...00}) + L_F(F^{(2), 0...01}) + \\ + L_F(F^{(2), 0...10}) + \dots + L_F(F^{(2), 1...11}) + 2 \cdot (2^{n-2} - 1) \leq \\ \leq 3 \cdot 2^{n-2} + 2 \cdot (2^{n-2} - 1) = 5 \cdot 2^{n-2} - 2 = (5/4) \cdot 2^n - 2.$$

Итак, при реализации булевой функции $f^{(n)} \in P_2^{(n)}$, отличной от константы, в базисе G_3 уточнена верхняя оценка показателя сложности

$$L_F(F_{с.ф.}^{(n)}, G_3) = (5/4) \cdot 2^n - 2. \quad (5)$$

Погрешность получаемой оценки (5) может быть большой (см. пример 1 и замечание 1. Поэтому для рассматриваемой минимизации представления функции разрабатывается **Алгоритм 1** на основе ФУ (5), состоящий из следующих шагов (опишем одну итерацию).

Шаг 1. Для формулы $F^{(n)}$ получить переменную x_i .

Шаг 2. Преобразовать формулу $F^{(n)}$ к виду (3), получая остаточные функции $F^{(n-1), 0}$ и $F^{(n-1), 1}$.

Шаг 3. Запишем формулы $F^{(n-1), 0}$ и $F^{(n-1), 1}$ в конец специальной таблицы, а из ее начала выбираем формулу для шага 1.

Шаги 1—3 выполняются до тех пор, пока в таблице имеется хотя бы одна остаточная функция.

Таким образом, исходная функция (и получаемые остаточные) $F^{(n)}$, в общем случае, разбивается на две более простые по сравнению с ней и две базисные (двухместные), соединяющие первые функции и выделяемую переменную x_i в одну формулу. Процесс продолжается, пока все остаточные функции таким образом (на основе декомпозиции) не перейдут в разряд реализованных. Так будет получена формула $F_{с.ф.}^{(n)}$ и оценка $L_F(F_{с.ф.}^{(n)})$.

Заметим, что вначале, по мере выполнения алгоритма 1, число остаточных функций, как правило, удваивается, а сами функции упрощаются. При этом число базисных функций, соединяющих их в одну формулу, увеличивается. Обсуждае-

мый алгоритм 1 на основе ФУ (3) относится к алгоритмам градиентного типа, он позволяет строить формулу $F_{с.ф.}^{(n)}$, реализующую функцию $f^{(n)}$ (возможно, с минимальным значением показателя L_F) за число шагов j , $1 \leq j < n$. Его применение иллюстрируется примером 1.

Пример 1. Функция $f^{(7)}$ задается полиномом Жегалкина $F^{(7)} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot x_5 \oplus x_1 \cdot x_6 \oplus x_7$, имеющим строение* $r = (4, 3, 2, 1)$. Требуется представить ее в классе скобочных формул, минимизируя показатель сложности L_F .

Составим табл. 1 повторяемости переменных x_i , $1 \leq i \leq 7$, в формуле $F^{(7)}$.

Таблица 1

x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
p_i	3	2	1	1	1	1	1

Выполним эквивалентные преобразования формулы $F^{(7)}$ в соответствии с ФУ (3):

$$F^{(7)} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot x_5 \oplus x_1 \cdot x_6 \oplus x_7 = \\ = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_2 \cdot x_5 \oplus x_6) \oplus x_7 = \\ = x_1 \cdot (x_2 \cdot (x_3 \cdot x_4 \oplus x_5) \oplus x_6) \oplus x_7 = \\ = x_1 \cdot (x_2 \cdot ((x_3 \cdot x_4) \oplus x_5) \oplus x_6) \oplus x_7 = F_{с.ф.}^{(7)}.$$

В соответствии с определением (3) выполнена декомпозиция функции $F^{(7)}$ в базисе G_3 и получена неповторная скобочная формула $F_{с.ф.}^{(7)}$ минимальной сложности $L_F(F_{с.ф.}^{(7)})_{\min} = 6$.

Замечание 1. На основе примера 1 можно строить счетные классы булевых формул определенного строения, характеризующихся минимальной сложностью L_F представления (доказываемой индукцией по n). В качестве простого примера предлагается функция $f^{(9)}$, задаваемая полиномом Жегалкина $F^{(9)}$ строения $r = (5, 4, 3, 2, 1)$:

$$F^{(9)} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_6 \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot x_7 \oplus x_1 \cdot x_9 \oplus \\ \oplus x_8 = x_1 \cdot (x_2 \cdot (x_3 \cdot ((x_4 \cdot x_5) \oplus x_6) \oplus x_7) \oplus x_9) \oplus x_8 = F_{с.ф.}^{(9)}. \quad (6)$$

Минимальное значение показателя $L_F(F^{(9)})_{\min} = 8$. Для наглядности и удобства сравнения представим результаты в одной табл. 2.

Таблица 2

Число переменных n	Сложность по числу букв L_6	Число шагов j	$L_F(F^{(n)})_{\min}$	$L_F(F_{с.ф.}^{(n)}) = (5/4) \cdot 2^n - 2$
1	2	3	4	5
7	10	3	6	158
9	15	4	8	638

Аналитически и из табл. 2 следует, что при возрастании n показатель L_6 , число шагов j и число L_F (минимальное) базисных функций увеличиваются (столбцы 1...4), но прогнозируемые оценки сложности увеличиваются быстрее (столбец 5). Особенности некоторых классов полиномов Жегалкина позволяют уменьшать верхние оценки сложности показателей L_F и L_6 , например, для класса симметрических БФ [7—9].

* Далее будем использовать термин "полином Жегалкина F строения r ".

Замечание 2. Выведенные оценки сложности представления булевых функций полезно использовать для автоматизации синтеза булевых формул и логических управляющих схем, записывая получаемые результаты в таблице [7], не выполняя на этапе анализа самого синтеза.

Рассмотрим еще примеры для лучшего знакомства с техникой решения задач. Будем стараться создавать средства для интеллектуализации алгоритма, который предусматривал бы возможность (и настраивался) модификации применительно к конкретной булевой формуле. Используемые средства (после применения эквивалентностей): в классе формул — скобки, в классе схем S — ветвление. Рассмотрим примеры применения ФУ (3) в целях синтеза формул, включая класс элементарных симметрических полиномов (ЭСП) Жегалкина $F_i^{(n)}$, где n — конечное число переменных, нижний индекс i — степень полинома.

Пример 2. Функция $f^{(4)}$ задается ЭСП Жегалкина $F_3^{(4)} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \oplus x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$. Представить функцию $f^{(4)}$ в классе формул F (и условно в классе схем S) и оценить их сложность для показателей L_F и L_S . По алгоритму 1 для первого способа преобразования получаем $F_3^{(4)} = x_1 \cdot (x_2 \cdot (x_3 \oplus x_4) \oplus x_3 \cdot x_4) \oplus x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$.

Показатель $L_F(F_3^{(4)}) = 8$, но для схемы S возможно ветвление (подчеркнутая часть) и тогда $L_S(F_3^{(4)}) = 7$.

Применяя второй вариант преобразования (метод дихотомии), получаем $F_3^{(4)} = x_1 \cdot x_2 \cdot (x_3 \oplus x_4) \oplus x_3 \cdot x_4 \cdot (x_1 \oplus x_2)$. Здесь ветвление не допускается и $L_S(F_3^{(4)}) = L_F(F_3^{(4)}) = 7$.

Пример 3. Функция $f^{(4)}$ задается ЭСП Жегалкина $F_2^{(4)} = x_1 \cdot x_2 \oplus x_1 \cdot x_3 \oplus x_1 \cdot x_4 \oplus x_2 \cdot x_3 \oplus x_2 \cdot x_4 \oplus x_3 \cdot x_4$, и по алгоритму 1 получаем $F_2^{(4)} = x_1 \cdot (x_2 \oplus x_3 \oplus x_4) \oplus x_4 \cdot (x_2 \oplus x_3) \oplus x_2 \oplus x_3$. Здесь $L_F(F_2^{(4)}) = 8$, и ветвление возможно (подчеркнутая часть) и в этом случае $L_S(F_2^{(4)}) = 7$.

В рассмотренных примерах 1—3 определены формула $F_{с.ф}^{(n)}$ и результат минимизации ее сложности по показателям L_F и L_S . Применим результаты исследования для получения (и минимизации) показателей сложности выражений вида $F_i^{(n)} \oplus F_j^{(m)}$.

Пусть $|X| = n$, $F_i^{(n)}$, $F_j^{(m)}$, $m \leq n$, $i \leq n$, $j \leq m$. Вначале на основе ФУ (3) получаем

$$F_i^{(n)} \oplus F_j^{(m)} = x_1 \cdot (F_{i-1}^{(n-1)} \oplus F_{j-1}^{(m-1)}) \oplus F_i^{(n-1)} \oplus F_j^{(m-1)}. \quad (7)$$

Для (7) выводим ФУ для показателя сложности L_B :

$$\begin{aligned} L_B\{F_i^{(n)} \oplus F_j^{(m)}\} &= L_B\{x_1 \cdot (F_{i-1}^{(n-1)} \oplus F_{j-1}^{(m-1)}) \oplus \\ &\oplus F_i^{(n-1)} \oplus F_j^{(m-1)}\} = 1 + L_B\{F_{i-1}^{(n-1)}\} + \\ &+ L_B\{F_{j-1}^{(m-1)}\} + L_B\{F_i^{(n-1)}\} + L_B\{F_j^{(m-1)}\} = \\ &= 1 + (i-1)C_{n-1}^{i-1} + (j-1)C_{m-1}^{j-1} + iC_{n-1}^i + \\ &+ jC_{m-1}^j = 1 + i(C_{n-1}^{i-1} + C_{n-1}^i) + \\ &+ j(C_{m-1}^{j-1} + C_{m-1}^j) - C_{n-1}^{i-1} - C_{m-1}^{j-1} = \\ &= 1 + iC_n^i + jC_m^j - C_{n-1}^{i-1} - C_{m-1}^{j-1}. \quad (8) \end{aligned}$$

Повторное применение выноса одного множителя в (8) за скобки дает дальнейшее уточнение верхней оценки

$$\begin{aligned} L_B(F_i^{(n)} \oplus F_j^{(m)})_{\min} &\leq \\ &\leq 1 + iC_n^i + jC_m^j - C_{n-1}^{i-1} - C_{m-1}^{j-1}. \quad (9) \end{aligned}$$

Для одного ЭСП $F_i^{(n)}$ оценка (9) имеет вид

$$L_B(F_i^{(n)})_{\min} \leq 1 + iC_n^i - C_{n-1}^{i-1}.$$

4. О классификации множества булевых функций.

Рассмотрим новый подход к изучению булевых функций из некоторых счетных классов в базисе G_3 .

Вначале разбиваем множество $P_2^{(n)}$ БФ $f^{(n)}$ на классы $\Phi^{(n)}$ по числу n , $n \in N$, существенных переменных из множества X . Заметим, что каждая БФ в базисе Жегалкина представляется единственным полиномом (с точностью до порядка слагаемых в сумме и порядка сомножителей в ЭК) [1—3]. В работе рассматриваются канонические полиномы Жегалкина $F^{(n)}$ строения $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_m)$.

Теперь на множестве $\Phi^{(n)}$ функций $f^{(n)}$ рассматриваем отношение "функция $f^{(n)}$ задается полиномом Жегалкина $F^{(n)}$ строения \mathbf{r} ". В результате получаем разбиение множества $\Phi^{(n)}$ функций на классы эквивалентности, обозначаемые $\Phi^{n, r}$, т. е. каждая функция $f^{(n)}$ класса $\Phi^{n, r}$ зависит от n переменных и задается полиномом Жегалкина $F^{(n)}$ строения \mathbf{r} . Множество полиномов Жегалкина $F^{(n)}$ строения \mathbf{r} обозначаем $\phi^{n, r}$. Эти классы $\Phi^{n, r}$ и $\phi^{n, r}$ эквивалентны, элементами одного из них являются функции, а элементами другого — соответствующие полиномы Жегалкина. При этом представляет интерес число $|\Phi^{n, r}|$ и сами функции $f^{(n)} \in \Phi^{n, r}$. Ответ на вопрос получается на основе подсчета числа различных полиномов Жегалкина $F^{(n)}$ строения \mathbf{r} .

5. Скобочные формулы и полиномы Жегалкина $F^{(n)}$, имеющие одно и то же строение. Рекурсивно определяем счетные классы булевых функций. Считаем, что здесь эти классы вначале задаются скобочными формулами, минимальными по числу использованных базисных функций, т. е. неповторными или с малой повторяемостью переменных, которые затем преобразуем в полиномы Жегалкина. Их можно определять по-разному. Стандартным назовем следующий **алгоритм 2** (рекуррентного построения БФ):

Шаг 1. Задаем число n переменных функции $f^{(n)}$, базовую начальную функцию g , тип преобразования ФУ из $(\&, \oplus)$ или $(\oplus, \&)$.

Шаг 2. Применяем многократно ФУ до тех пор, пока не получим требуемую функцию, т. е. выводим формулу $F^{(n)}$, являющуюся скобочной (бесповторной или с малой повторяемостью переменных).

Шаг 3. Преобразуем скобочную формулу $F^{(n)}$ в полином Жегалкина $F^{(n)}$ того же строения \mathbf{r} , сохраняя обозначение $F^{(n)}$. Про него будем говорить, что он представляет класс полиномов ϕ^n, r и наряду со скобочными формулами задает один из классов так называемых стандартных функций, получаемых по алгоритму 2, число которых счетное. Множество таких множеств также является счетным.

Пример 4. Задаем $n = 6$, базисную функцию $g_{\&}^{(2)} = x_1 \cdot x_2$, ФУ типа $(\oplus, \&)$. Применяя ФУ, выводим скобочную формулу и полином Жегалкина:

$$F^{(6)} = (((x_1 \cdot x_2) \oplus x_3) \cdot x_4 \oplus x_5) \cdot x_6 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_6 \oplus \oplus x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 \oplus x_5 \cdot x_6, \text{ строение } \mathbf{r} = (4, 3, 2);$$

для $n = 8$ получаем

$$(F^{(8)})_1 = (((((x_1 \cdot x_2) \oplus x_3) \cdot x_4 \oplus x_5) \cdot x_6 \cdot x_7) \cdot x_8 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_5 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_7 \cdot x_8,$$

строение $\mathbf{r} = (5, 4, 3, 2)$ и по алгоритму 1 минимальное значение показателя $L_F(F^{(8)})_{\min} = 7$.

Пример 5. Задаем $n = 6$, базисную функцию $g_{\oplus}^{(2)} = x_1 \oplus x_2$, ФУ типа $(\&, \oplus)$. Применяя ФУ, выводим скобочную формулу, а также полином Жегалкина:

$$F^{(6)} = ((x_1 \oplus x_2) \cdot x_3 \oplus x_4) \cdot x_5 \oplus x_6, F^{(6)} = x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 \oplus \oplus x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \oplus x_4 \cdot x_5 \oplus x_6, \text{ строение } \mathbf{r} = (3, 3, 2, 1);$$

для $n = 8$ получаем

$$(F^{(8)})_2 = (((x_1 \oplus x_2) \cdot x_3 \oplus x_4) \cdot x_5 \oplus x_6) \cdot x_7 \oplus x_8 = x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_7 \oplus x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_7 \oplus x_4 \cdot x_5 \cdot x_7 \oplus x_6 \cdot x_7 \oplus x_8,$$

строение $\mathbf{r} = (4, 4, 3, 2, 1)$ и по алгоритму 1 минимальное значение показателя $L_F(F^{(8)})_{\min} = 7$.

Начальную функцию можно задавать разными формулами с повторением переменных, но минимальными по числу букв или подфункций.

Пример 6. Задаем $n = 5$, базисную функцию — *голосования*, ФУ типа $(\&, \oplus)$. Применяя ФУ, выводим скобочную

формулу с малой повторяемостью переменных и полином Жегалкина:

$$F^{(5)} = (x_1 \cdot x_2 \oplus x_1 \cdot x_3 \oplus x_2 \cdot x_3) \cdot x_4 \oplus x_5 = (x_1 \cdot (x_2 \oplus x_3) \oplus \oplus x_2 \cdot x_3) \cdot x_4 \oplus x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \oplus x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_5,$$

строение $\mathbf{r} = (3, 3, 3, 1)$. По алгоритму 1 минимальное значение показателя $L_F(F^{(5)})_{\min} = 6$.

Вывод 1. Получаем последовательность функций $f^{(n)}$, $n \in N$, минимальной сложности, задаваемых соответствующими полиномами Жегалкина $F^{(n)}$, $n \in N$.

6. Методы синтеза различных полиномов Жегалкина, имеющих одно и то же строение. Имеются разные технологии синтеза полиномов Жегалкина, включая указанные выше (см. раздел 5, примеры 4—6). Из других методов можно указать следующие: для произвольного (канонического) полинома Жегалкина $F^{(n)}$ по определенным правилам выполняются специальные перестановки переменных, которые приводят к новым полиномам, при этом подсчитывается их число; для шаблона формулы (с описанием действий с ними) по правилам комбинаторики выбираются подстановки по подмножествам множества X (на основе ЭК и их рангов \mathbf{r}). Ниже приведем некоторые такие перестановки и подстановки. При этом формируется (синтезируется) новый полином Жегалкина того же строения \mathbf{r} . Напомним, две монотонные элементарные конъюнкции над множеством X называются равными, если они представляют произведение одних и тех же переменных. Два полинома Жегалкина различаются, если они различаются хотя бы одной элементарной конъюнкцией, иначе они равны.

Сформулируем некоторые функциональные свойства перестановок и подстановок переменных:

1) перестановка двух переменных какой-либо одной ЭК функционально ее не меняет (сохраняет тот же полином Жегалкина и, следовательно, соответствующую функцию);

2) если $p_i = 1$, $i = \overline{1, n}$, т. е. $F^{(n)}$ — неповторный полином Жегалкина, то перестановка переменных x_i и x_j ($x_i \neq x_j$) из разных ЭК приводит к новому полиному;

3) если переменная x_i ($p_i \geq 2$, $p_j = 1$, $x_i \neq x_j$, $1 \leq i \leq n$) в какой-либо ЭК в первый раз заменяется на переменную x_j (встречающуюся один раз) из другой ЭК, то эта замена выполняется во всех последующих ЭК, где появляется x_i , в свою очередь, x_j заменяется на x_i (имеются и другие свойства) [6].

Для произвольного (канонического) полинома Жегалкина строения \mathbf{r} , синтез нового полинома Жегалкина и подсчет числа всех полиномов одного и того же строения \mathbf{r} начинается с определения элементарной конъюнкции K_m . Затем из остающихся переменных с учетом повторения формируется ЭК K_{m-1} и так далее и заканчивается подстановкой (без выбора) в соответствующие места ЭК K_1 тех переменных, которые остаются к этому шагу.

Аналогично формируются ЭК K_1, K_2 и так далее до подстановки без выбора в ЭК K_m тех переменных, которые остаются к этому шагу. Фактически выбор переменных для подстановки их в ЭК выполняется для числа $m - 1$ ЭК. Эти два метода синтеза полиномов обозначаем сокращенно K_m-K_1 и K_1-K_m .

Для метода K_m-K_1 (K_1-K_m) синтеза получаемые элементарные конъюнкции K_m (K_1) попарно различаются, а следовательно, различаются полиномы Жегалкина $F^{(n)}$ строения \mathbf{r} , которые могут различаться или по всем элементарным конъюнкциям, или по одной, или по двум и т. д. Формировать ЭК полинома Жегалкина в разделе 7 будем так, чтобы, по возможности учитывая зависимость (повторяемость переменных) между начальными и последующими ЭК, получать различие полиномов по всем ЭК, возможно, кроме последних ЭК в методе.

При этом число различных полиномов, получаемых методами K_m-K_1 или K_1-K_m синтеза, обозначаем соответственно $M_{m-1}(n)$ или $M_{1-m}(n)$. Числа $M_{m-1}(n)$ и $M_{1-m}(n)$ являются оценками мощности класса $\Phi^{n,r}$ функций $f^{(n)}$, задаваемых полиномом Жегалкина $F^{(n)}$ одного и того же строения \mathbf{r} .

Множество полиномов Жегалкина $F^{(n)}$ одного и того же строения \mathbf{r} также обозначаем $\phi_{i,j}$ где

- $i = 1$ обозначает метод синтеза K_m-K_1 и $|\phi_{1,j}| = M_{m-1}(n)$;
- $i = 2$ обозначает метод синтеза K_1-K_m и $|\phi_{2,j}| = M_{1-m}(n)$;
- $i = 3$ обозначает все другие методы синтеза полиномов;
- $j = 1, 2, \dots, J$ — номера получаемых соответствующих полиномов Жегалкина одного и того же строения.

$M_{m-1}(n)$ или $M_{1-m}(n)$ — это число полиномов для определенного метода синтеза, а множество самих полиномов принадлежит $\Phi^{n,r}$. При этом

$$\begin{aligned} |\Phi^{n,r}| &= |\phi_{1,j} \cup \phi_{2,j} \cup \phi_{3,j}| = \\ &= |\phi_{1,j}| + |\phi_{2,j}| + |\phi_{3,j}| - |\phi_{1,j} \cap \phi_{2,j}| - \\ &- |\phi_{1,j} \cap \phi_{3,j}| - |\phi_{2,j} \cap \phi_{3,j}| + |\phi_{1,j} \cap \phi_{2,j} \cap \phi_{3,j}| \leq \\ &\leq M_{m-1}(n) + M_{1-m}(n) + |\phi_{3,j}|. \end{aligned} \quad (10)$$

Если $\phi_{3,j} = \emptyset$, то из (10) следует верхняя оценка числа булевых функций класса $\Phi^{n,r}$ (полиномов Жегалкина $F^{(n)}$):

$$\begin{aligned} |\Phi^{n,r}| &= |\phi_{1,j} \cup \phi_{2,j}| = |\phi_{1,j}| + |\phi_{2,j}| - \\ &- |\phi_{1,j} \cap \phi_{2,j}| \leq M_{m-1}(n) + M_{1-m}(n). \end{aligned} \quad (11)$$

Оценка (11) далее уточняется на основе вывода 2 (теоремы 1—3).

7. Мощность классов функций, задаваемых полиномами Жегалкина, имеющими одно строение. Для подсчета числа различных полиномов Жегалкина $F^{(n)}$ строения \mathbf{r} используем правила суммы и произведения из комбинаторики. При этом будем различать полиномы Жегалкина с повторением переменных (данный раздел) и неповторные (см.

раздел 8). Для канонического полинома Жегалкина выполняются неравенства $r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_{m-1} \geq r_m \geq 1$. Рассмотрим некоторые случаи.

Если $r_m = 1$ ($m > 1$), то число вариантов различия

полиномов Жегалкина по ЭК K_m равно $C_n^{r_m} = C_n^1 = n$, они уже различаются, по крайней мере, последней ЭК. Если $r_m \geq 2$ ($m > 1$), то для ЭК K_m выбор r_m

переменных осуществляется числом $C_n^{r_m}$ способов.

Для неповторных полиномов Жегалкина оценка числа вариантов их различия, например, по двум элементарным конъюнкциям K_{m-1} и K_m ($m > 2$) по

правилу произведения равна $C_n^{r_m} C_{n-r_m}^{r_{m-1}}$ и т. д. Для полиномов с повторением переменных в этом случае рассматриваемая оценка подлжет соответствующей корректировке.

Если $r_{m-2} > r_{m-1} = r_m = 1$, то получаем случаи, аналогичные предыдущему: $C_n^1 C_{n-1}^1 = n(n-1)$ и т. д.

При синтезе ЭК K_1 полинома $F^{(n)}$ способом

K_1-K_m их число равно $C_n^{r_1}$, причем здесь все получаемые ЭК K_1 попарно различаются.

Применим систематический подход к изучению классов $\Phi^{n,r}$ стандартных функций $f^{(n)}$, имеющих минимальную сложность L_F . Вначале по алгоритму 2 (раздел 5, см. примеры 4—6) находим стандартного представителя класса $\phi^{n,r}$, для которого выполняем перестановки переменных из X в полиноме Жегалкина так, чтобы получать различные булевы функции рассматриваемого класса $\Phi^{n,r}$ и подсчитывать их число.

Итак, для определенного n и соответствующего строения \mathbf{r} подсчитываем число возможных перестановок, т. е. число полиномов Жегалкина.

Пример 7. Задаем $n = 9$, начальную функцию $g^{(3)} = (x_1 \cdot x_2) \oplus x_3$, ФУ типа $(\&, \oplus)$. Применяя алгоритмы 2 и 1, получаем стандартную скобочную формулу, полином Жегалкина строения $\mathbf{r} = (5, 4, 3, 2, 1)$, а также минимальное значение показателя $L_F(F^{(9)})_{\min} = 8$, т. е.

$$\begin{aligned} F^{(9)} &= (((x_1 \cdot x_2 \oplus x_3) \cdot x_4 \oplus x_5) \cdot x_6 \oplus x_7) \cdot x_8 \oplus x_9 = \\ &= x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_5 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_7 \cdot x_8 \oplus x_9. \end{aligned} \quad (12)$$

Для стандартного полинома Жегалкина (12) строения $\mathbf{r} = (5, 4, 3, 2, 1)$ синтезируем любой полином Жегалкина из полиномов, число которых равно M_{m-1} (или M_{1-m}), методом K_m-K_1 (или K_1-K_m):

$$M_{m-1} = C_9^1 C_8^2 C_6^2 C_4^2 C_2^2 = 9!/2^4, \quad (13)$$

$$M_{1-m} = C_9^5 C_4^1 C_3^1 C_2^1 C_1^1 = 9!/5!. \quad (14)$$

Заметим, что полиномы (6) и (12) различаются по всем ЭК, но благодаря одному строению \mathbf{r} принадлежат одному классу $\phi^{9,r}$ (функций $f^{(9)} \in \Phi^{9,r}$) и имеют совпадающее минимальное значение показателя $L_F(F^{(9)})_{\min} = 8$. Для полиномов (6) или (12) оценки их числа (одного и того же строения) будут определяться соотношениями (13) или (14).

Алгоритм 3. Синтез элементарных конъюнкций и канонического полинома Жегалкина методом K_m-K_1 (на примере полинома (12) и оценки (13)). Подготовительная часть. Определяем $X^{(9)} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$. Каждой элементарной конъюнкции $K_i, i = \overline{1, m}$, ставится в соответствие множество \hat{K}_i переменных этой конъюнкции, т. е. $\hat{K}_i = K'_i \cup K''_i$, где K'_i — множество переменных однократного (или первого) вхождения в полином $F^{(n)}$, оно выбирается; K''_i — множество переменных многократного (последующего второго, третьего, ...) вхождения в полином $F^{(n)}$, оно выбрано ранее. Общее обозначение переменной $x_{i,j}$, полинома $F^{(n)}$, где i — номер ЭК, j — номер переменной в ЭК. Какие-то подмножества могут быть пустыми.

Шаг 1. C_9^1 способами выбираем переменную $x_{5,1} \in X^{(9)}$, образуя множество K'_5 . Из множества $X^{(9)}$ удаляем переменную $x_{5,1}$, обозначая результат $X^{(8)}$, причем $x_{5,1} \in K'_5$ и $K''_5 = \emptyset$.

Шаг 2. C_8^2 способами выбираем переменные $x_{4,1}, x_{4,2} \in X^{(8)}$, образуя множество K'_4 , причем $x_{4,1} = x_8, x_{4,2} = x_7$. Из множества $X^{(8)}$ удаляем эти переменные, обозначая результат $X^{(6)}$. Переменная x_8 из K'_4 входит во все предшествующие подмножества, поэтому включаем ее в соответствующие множества $K''_i, i = 1, 2, 3; K''_4 = \emptyset$.

Шаг 3. C_6^2 способами выбираем переменные $x_{3,1}, x_{3,2} \in X^{(6)}$, образуя множество K'_3 , причем $x_{3,1} = x_5, x_{3,2} = x_6$ и, как ранее выбрано, $x_{3,3} = x_8 \in K''_3$. Из множества $X^{(6)}$ удаляем переменные $x_{3,1}$ и $x_{3,2}$, обозначая результат $X^{(4)}$.

Шаг 4. C_4^2 способами выбираем переменные $x_{2,1}, x_{2,2} \in X^{(4)}$, образуя множество K'_2 , причем $x_{2,1} = x_3, x_{2,2} = x_4$ и, как ранее выбрано, $x_{2,3} = x_6 \in K''_2$. Из множества $X^{(4)}$ удаляем переменные $x_{2,1}$ и $x_{2,2}$, обозначая результат $X^{(2)}$.

Шаг 5. Для множества \hat{K}_1 все переменные определены (подставляемые впервые или повторяющиеся) и фактически выбор отсутствует.

Шаг 6. Из полученных множеств \hat{K}_i образуем ЭК $K_i, i = 1, 2, \dots, m$, и берем их сумму по mod 2. Итог — получен требуемый полином Жегалкина.

Аналогично строится алгоритм синтеза полинома Жегалкина методом K_1-K_m .

Пример 8. Для полинома Жегалкина

$$(F^{(8)})_1 = (((x_1 \cdot x_2 \oplus x_3) \cdot x_4 \oplus x_5) \cdot x_6 \oplus x_7) \cdot x_8 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_5 \cdot x_6 \cdot x_8 \oplus x_7 \cdot x_8 \text{ строения } \mathbf{r} = (5, 4, 3, 2), \quad (15)$$

представляющего класс (8, \mathbf{r}) полиномов из примера 4, подсчитать их число, т. е. число различных функций $f^{(8)} \in \Phi^{8,r}$.

Находим оценки мощности множества $\Phi^{8,r}$ на основе метода синтеза K_m-K_1 (и K_1-K_m):

$$M_{m-1} = C_8^2 C_6^2 C_4^2 C_2^2 = 8!/2^4, \quad (16)$$

$$M_{1-m} = C_8^5 C_3^1 C_2^1 C_1^1 = 8!/5!. \quad (17)$$

В (16) и (17) выражения $C_2^2 = C_1^1 = C_n^n = 1$.

Пример 9. Для полинома

$$(F^{(8)})_2 = (((x_1 \oplus x_2) \cdot x_3 \oplus x_4) \cdot x_5 \oplus x_6) \cdot x_7 \oplus x_8 = x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_7 \oplus x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_7 \oplus x_4 \cdot x_5 \cdot x_7 \oplus x_8 \text{ строения } \mathbf{r}' = (4, 4, 3, 2, 1), \quad (18)$$

представляющего другой класс $\Phi^{8,r'}$ полиномов из примера 5, подсчитать их число, т. е. различных функций $f^{(8)} \in \Phi^{8,r'}$.

Находим оценки $|\Phi^{8,r'}| (M_{m-1}$ и $M_{1-m})$ мощности множества $\Phi^{8,r'}$ на основе методов синтеза K_m-K_1 (и K_1-K_m):

$$M_{m-1} = C_8^1 C_7^2 C_5^2 C_3^2 C_1^1 = 8!/2^3, \quad (19)$$

$$M_{1-m} = C_8^4 C_4^1 C_3^1 C_2^1 C_1^1 = 8!/4!. \quad (20)$$

Функции (15) и (18) — разных классов (задаются различными полиномами Жегалкина $(F^{(8)})_1$ и $(F^{(8)})_2$, разного строения \mathbf{r} и \mathbf{r}'), но оценки числа полиномов имеют сходные.

Обобщая примеры и оценки (10)–(20), для мощности класса функций $f^{(n)}$ с учетом выше определенных правил формулируем теоремы.

Общая часть условий теорем. Заметим, что определение оценок мощности $|\Phi^{n,r'}|$ классов функций $f^{(n)} \in P_2^{(n)}$ на основе (11) сводится к получению оценки числа различных полиномов Жегалкина строения \mathbf{r} , синтез которых здесь выполняется методами K_m-K_1 и K_1-K_m . Пусть $\Phi^{n,r}, n \geq 2$, счетный класс булевых функций, минимальных по показателю L_F , задаваемых соответствующими полиномами Жегалкина $F^{(n)}$ строения

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= (\lfloor n/2 \rfloor, \lfloor n/2 \rfloor - 1, \lfloor n/2 \rfloor - 2, \dots, 3, 2, 1) = \\ &= (k, k-1, k-2, \dots, 2, 1), \\ \mathbf{r} &= (\lceil n/2 \rceil, \lceil n/2 \rceil - 1, \lceil n/2 \rceil - 2, \dots, 3, 2, 1) = \\ &= (k+1, k, k-1, \dots, 2, 1) \end{aligned}$$

(или возможны другие случаи).

Докажем формулируемые далее теоремы методом математической индукции, рассматривая их отдельно для четных и нечетных чисел n .

Теорема 1. Число полиномов Жегалкина $F^{(n)}$, синтезируемых методом K_m-K_1 , равно

$$M_{m-1}(n) = n!/2^k = n!/2^{\lfloor n/2 \rfloor},$$

где $n = 2k + 1$, $k \in N$.

Доказательство. С помощью метода K_m-K_1 синтеза получаем

$$\begin{aligned} M_{m-1}(n) &= C_{2k+1}^1 C_{2k}^2 C_{2k-2}^2 \dots C_4^2 C_2^2 = \\ &= \{(2k+1)(2k)\dots(k+1)k(k-1)\dots 2 \cdot 1\}/2^k = \\ &= (2k+1)!/2^k. \end{aligned} \quad (21)$$

При $k = 1$ получаем $n = 3$, $F^{(3)} = (x_1 \cdot x_2) \oplus x_3$, $\mathbf{r} = (2, 1)$, $M_{m-1} = C_3^1 C_2^2 = 3!/2$. Оценка имеет место для $n = 3$.

Предположим теперь, что оценка (21) справедлива и надо из нее вывести оценку $M_{m-1}(n+1) = (n+1)!/2^{k+1}$. Имеем

$$\begin{aligned} M_{m-1}(n+1) &= \\ &= C_{2k+3}^1 C_{2k+2}^2 C_{2k}^2 C_{2k-2}^2 \dots C_4^2 C_2^2 = \\ &= (2k+3)\{(2k+2)/2\}\{(2k+1)C_{2k}^2 C_{2k-2}^2 \dots C_2^2\} = \\ &= (2k+3) \cdot \frac{2k+2}{2} \cdot M_{m-1}(n) = \\ &= (2k+3) \cdot \frac{2k+2}{2} \cdot (2k+1)!/2^k = \\ &= (2k+3)!/2^{k+1} = (n+1)!/2^{k+1}, \end{aligned}$$

что и требовалось получить.

Выбор используемых сочетаний объясняется особенностями строения полинома Жегалкина $F^{(n)}$ и повторения в нем переменных.

Теорема 2. Число полиномов Жегалкина $F^{(n)}$, синтезируемых методом K_1-K_m , равно

$$M_{1-m}(n) = n!/\sqrt{n/2!},$$

где $n = 2k + 1$, $k \in N$.

Доказательство. С помощью метода K_1-K_m синтеза получаем

$$\begin{aligned} M_{1-m}(n) &= C_{2k+1}^{k+1} C_k^1 C_{k-1}^1 \dots C_1^1 = \\ &= \{(2k+1)(2k)\dots(k+1)\}\{k(k-1)\dots 1\}/(k+1)! = n!/\sqrt{n/2!}. \end{aligned} \quad (22)$$

При $k = 1$ получаем $n = 3$, $F^{(3)} = (x_1 \cdot x_2) \oplus x_3$, $\mathbf{r} = (2, 1)$, $M_{1-m} = C_3^1 C_2^2 = 3!/2!$. Оценка имеет место для $n = 3$.

Предположим теперь, что оценка (22) справедлива, и надо из нее вывести оценку $M_{1-m}(n+1) = (n+1)!/\sqrt{(n+1)/2!}$.

Рассмотрим

$$\begin{aligned} M_{1-m}(n+1) &= C_{2k+3}^{k+2} C_{k+1}^1 C_k^1 \dots C_1^1 = \\ &= \{(2k+3)(2k+2)(2k+1)\dots(k+2)\}/(k+2)! \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \{(k+1)k \dots 2 \cdot 1\} = \{(2k+3)(2k+2)/(k+2)\} \times \\ &\times \{(2k+1)(2k)(2k-1)\dots(k+2)(k+1)\dots \times \\ &\times 2 \cdot 1\}/(k+1)! = \{(2k+3)(2k+2)/(k+2)\} \times \\ &\times \{M_{1-m}(n) = (n+1)!/\sqrt{(n+1)/2!}\}, \end{aligned}$$

что и требовалось получить.

Теорема 3. Оценки полиномов Жегалкина $F^{(n)}$, получаемых методами K_m-K_1 и K_1-K_m , соответственно равны

$$\begin{aligned} M_{m-1}(n) &= n!/2^k = n!/2^{n/2-1}; \\ M_{1-m}(n) &= n!/\sqrt{n/2!}, \end{aligned}$$

где $n = 2k$, $k \in N$.

Теорема 3 доказывается аналогично теоремам 1 и 2.

Вывод 2. Результаты, сформулированные в теоремах 1–3, используются при получении верхних оценок (11) числа булевых функций класса $\Phi^{n,r}$ (полиномов Жегалкина $F^{(n)} \in \phi^{n,r}$).

8. Мощность класса функций, задаваемых бесповторными полиномами Жегалкина. Проведем исследование некоторых случаев задания булевых функций бесповторными полиномами Жегалкина.

Пример 10. Получить оценки M_{m-1} и M_{1-m} для числа полиномов $F^{(10)}$, одного и того же строения $\mathbf{r} = (4, 3, 2, 1)$, если $F^{(10)} = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \oplus x_5 \cdot x_6 \cdot x_7 \oplus x_8 \cdot x_9 \oplus x_{10}$. Получаем методами K_m-K_1 и K_1-K_m класс $\phi^{10,r}$ бесповторных полиномов Жегалкина $F^{(n)} \in \phi^{n,r}$, минимальное значение показателя $L_F(F^{(10)})_{\min} = 9$, а также

$$M_{m-1} = C_{10}^4 C_6^3 C_3^2 C_1^1 = 10!/(4! \cdot 3! \cdot 2! \cdot 1!), \quad (23)$$

$$M_{1-m} = C_{10}^1 C_9^2 C_7^3 C_4^4 = 10!/(1! \cdot 2! \cdot 3! \cdot 4!). \quad (24)$$

Из (23) и (24) следует, что оценки мощности класса $\phi^{10,r}$ для такого типа условий и рассматриваемых методов синтеза полиномов Жегалкина совпадают, а кроме того, перестановки переменных в полиноме в рамках его строения позволяют порождать новые БФ.

Теорема 4. Функция $f^{(n)} \in \Phi^{n,r}$ задается полиномом Жегалкина $F^{(n)} = K_1 \oplus K_2$, где $n = r_1 + r_2$, $r_1 \geq r_2$, строение $\mathbf{r} = (r_1, r_2)$. Тогда оценки $M_{m-1}(n)$ и $M_{1-m}(n)$ мощности класса $\Phi^{n,r}$, получаемые соответственно методами K_m-K_1 и K_1-K_m синтеза, удовлетворяют равенству

$$M_{1-m}(n) = M_{m-1}(n).$$

Действительно,

$$\begin{aligned} M_{1-m} &= C_n^{r_1} = \{n(n-1)\dots(n-r_1+1)\}/r_1! = \\ &= \{n(n-1)\dots(r_2+1)r_2!\}/(r_1!r_2!) = n!/(r_1!r_2!), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{m-1} &= C_n^{r_2} = \{n(n-1)\dots(n-r_2+1)\}/r_2! = \\ &= \{n(n-1)\dots(r_1+1)r_1!\}/(r_1!r_2!) = n!/(r_1!r_2!), \end{aligned}$$

что означает совпадение мощностей множеств $M_{1-m}(n) = M_{m-1}(n)$.

Теорема 5. Функция $f^{(n)} \in \Phi^{n, r}$ задается полиномом Жегалкина $F^{(n)} = K_1 \oplus K_2 \oplus x_i$, где $n = r_1 + r_2 + r_3$, $r_1 \geq r_2 \geq r_3 = 1$, строения $\mathbf{r} = (r_1, r_2, 1)$. Тогда оценки $M_{m-1}(n)$ и $M_{1-m}(n)$ мощности класса $\Phi^{n, r}$, получаемые соответственно методами K_m-K_1 или K_1-K_m синтеза, удовлетворяют неравенству

$$M_{1-m}(n) < M_{m-1}(n).$$

Получаем

$$\begin{aligned} M_{m-1}(n) &= C_n^1 C_{n-1}^{r_2} C_{r_1}^{r_1} = \\ &= \{n(n-1) \cdot \dots \cdot (n-r_2)\}/r_2! = \\ &= \{n(n-1) \cdot \dots \cdot (r_1+1)r_1!\}/(r_1!r_2!) = n!/(r_1!r_2!), \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{1-m}(n) &= C_n^{r_1} C_{n-r_1}^{r_2} C_1^1 = \{n(n-1) \cdot \dots \cdot \\ &\cdot (n-r_1+1)\}/r_1! = \{n(n-1) \cdot \dots \cdot (r_2+2)\} \times \\ &\times (r_2+1)!/(r_1!(r_2+1)!) = n!/(r_1!(r_2+1)!). \quad (26) \end{aligned}$$

Из (25) и (26) следует:

- $M_{m-1}(n) - M_{1-m}(n) > 0$, что завершает доказательство теоремы 5;
- эффективность метода K_m-K_1 синтеза по сравнению с методом K_1-K_m — большая по числу получаемых функций.

Итак, для \forall булевой функции $f^{(n)} \in P_2^{(n)}$, $n \in N$,

задаваемой полиномом Жегалкина $F^{(n)}$ строения $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_m)$, устанавливается (в базисе G_3):

- аналитическая верхняя оценка (5) показателя сложности $L_F(F^{(n)})$, которая может быть сильно завышенной; поэтому для уточнения оценки (5) параллельно дополнительно приводится алгоритм 1 градиентного типа (жадный) в целях получения эффективной, минимизированной оценки $L_F(F^{(n)})$ (на основе численного решения);
- классы $\Phi^{n, r}$ функций $f^{(n)}$ допускают разбиение на число $q_j, j = \overline{1, J}$, подклассов, характеризующихся тем (отношением эквивалентности), что эффективные оценки показателя $L_F(F^{(n)})$ сложности функций $f^{(n)}$ этих подклассов совпадают, т. е. $\Phi^{n, r} = \bigcup_{j=1}^{q_j} (\Phi^{n, r})_j$, и для изучения их показателя L_F достаточно рассматривать по одной функции из подкласса $(\Phi^{n, r})_j, j = \overline{1, J}$; отметим, что для отдельных счетных классов $\Phi^{n, r}$ булевых функций имеем их представление минимальной сложности $L_F(F^{(n)})_{\min}$.

Это также относится к полиномам Жегалкина $F^{(n)} \in (\Phi^{n, r})_j$.

Заключение. В статье развивается математический аппарат, позволяющий эффективно (на основе оптимизирующего, жадного алгоритма) выполнять реализацию булевых функций в классах формул и схем из функциональных элементов. Аппарат включает функциональные уравнения, применяемые для декомпозиции и синтеза булевых формул и

схем, позволяя, априори, получать оценки L_F или L_S показателей сложности. Минимизация показателей сложности синтеза формул достигается за счет расширения множества применяемых эквивалентностей и использования скобочных формул, а минимизация синтеза схем из ФЭ — дополнительно за счет ветвления отдельных их выходов.

Результаты рекомендуется использовать при организации базы данных и знаний в области приложений дискретной математики и математической логики, в частности, для агентных систем.

В связи с этим, отвечая растущим потребностям в информационных и вычислительных ресурсах в образовании, науке и технике, в работе [10] достаточно подробно и полно излагается перспективный подход к решению таких задач на основе агентных технологий. В последнее время на одно из направлений искусственного интеллекта претендуют исследования с названием "агентные системы" (АС). Это направление возникло в целях упрощения, облегчения общения пользователя с компьютером при расширении и увеличении его возможностей.

Метод АС на основе теории систем (методов декомпозиции, классификации, структуризации и др.) позволяет сводить решение трудно формализуемых задач к решению системы взаимосвязанных упрощенных задач. Решение этих задач достигается, как правило, с помощью специальных программ, в том числе, рекурсивных программ, разработка которых больше становится искусством программирования.

Список литературы

1. Журавлев Ю. И. Теоретико-множественные методы в алгебре логики // Проблемы кибернетики. 1962. № 8.
2. Лупанов О. Б. О сложности реализации функций алгебры логики формулами // Проблемы кибернетики. Вып. 3. М.: Физматгиз, 1960.
3. Яблонский С. В. Об алгоритмических трудностях синтеза минимальных контактных схем // Проблемы кибернетики, № 2. М.: ГФ-М лит., 1959.
4. Успенский В. А. Лекции о вычислимых функциях. М.: Физматгиз, 1960.
5. Мальцев А. И. Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Физматгиз, 1965.
6. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. М.: Физматгиз, 1959. 431 с.
7. Чебурахин И. Ф. Сложность симметрических полиномов Жегалкина. XVII Международная школа-семинар "Синтез и сложность управляющих систем" имени акад. О. Б. Лупанова. (27.10—1.11.2008. Новосибирск). 2008. С. 180—185.
8. Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. № 3. 2011. С. 27—34.
9. Чебурахин И. Ф. О минимизации сложности представления булевых функций из некоторых классов "Интеллектуальные системы и компьютерные науки" // X Междунар. конф.: Москва, 5—10 декабря 2011 г. Сб. материалов / Под общ. ред. В. А. Садовниченко, В. Б. Кудрявцева, А. В. Михалева. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 311—314. Электронное научное издание — 420 с. ISBN 978-5-317-04011-6.
10. 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.

УДК 624.046.5

Т. А. Алиев, д-р техн. наук, проф.,
академик НАНА, директор,

Э. Р. Алиев, канд. техн. наук, зав. лаб.,

Т. А. Ализаде, канд. техн. наук, зав. лаб.,
alizadabaku@gmail.com

Институт кибернетики НАН Азербайджана,
г. Баку, Азербайджан

Технологии помехомониторинга скрытого периода изменения сейсмостойкости морских сооружений

Обсуждаются технологии помехомониторинга, которые позволяют обнаруживать ярко выраженные изменения сейсмостойкости морских сооружений в начальном скрытом периоде. Благодаря этим технологиям появляется возможность организовывать своевременные профилактические мероприятия для предотвращения дальнейших серьезных деформаций в наиболее уязвимых местах сооружения, что дает возможность значительно сократить общий объем ремонтных работ, средств и уменьшить число внезапных разрушений.

Ключевые слова: технология, мониторинг, сейсмостойкость, морская стационарная платформа, эстакада, зашумленный сигнал, корреляционная функция, дисперсия помехи, матрица, идентификация

Введение

Известно, что в настоящее время отсутствуют недорогие и достаточно надежные системы контроля сейсмостойкости морских стационарных платформ, эстакад и прочих морских сооружений [1–5]. Также известно, что в странах, расположенных в сейсмоактивных зонах, в результате зарождения аномальных сейсмических процессов часто происходят маломощные землетрясения. В связи с этим очевидно, что для обеспечения безопасности эксплуатаций указанных объектов после каждого землетрясения необходимо осуществление мониторинга начала скрытого периода изменения их сейсмостойкости [6–11].

Постановка задачи

В реальной жизни в сейсмических регионах при эксплуатации морских объектов нефтегазодобычи и транспортировки после определенного промежутка времени T_0 нормального функционирования в

силу различных причин наступает период T_1 их скрытого перехода в аварийное состояние. Довольно часто это происходит в результате маломощных землетрясений, что приводит к изменению сейсмостойкости этих объектов. В результате последующих маломощных землетрясений, штормов с ураганными ветрами и ливневыми дождями и ряда других факторов они переходят во временной интервал явно выраженного аварийного состояния T_2 .

Несмотря на различия длительности времен T_0 , T_1 и T_2 задача мониторинга в рассматриваемых случаях сводится к обеспечению надежной индикации начала времени T_1 периода скрытого изменения сейсмостойкости рассматриваемых объектов.

В связи с этим рассмотрим этот вопрос более подробно.

Допустим, что при нормальном состоянии морских объектов нефтегазодобычи в период времени T_0 для зашумленных центрированных сигналов $g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)$, получаемых на выходах соответствующих датчиков, справедливы равенства [4, 5]

$$\omega_{T_0} [g(i\Delta t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_g}} e^{-\frac{(g(i\Delta t))^2}{2D_g}}, \quad (1)$$

$$D_\varepsilon = R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) \approx 0, D_g \approx D_X; R_{gg}(\mu) \approx R_{XX}(\mu); \\ m_g \approx m_X \approx m_\varepsilon \approx 0; R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx 0, r_{X\varepsilon} \approx 0,$$

где $\omega_{T_0} [g(i\Delta t)]$ — закон распределения сигнала $g(i\Delta t)$; D_ε , D_X , D_g — оценки дисперсий помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, полезного $X(i\Delta t)$ и суммарного $g(i\Delta t)$ сигналов соответственно; $R_{XX}(\mu)$, $R_{gg}(\mu)$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ — оценки корреляционных функций полезного сигнала $X(i\Delta t)$, суммарного сигнала $g(i\Delta t)$ и помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ соответственно; m_ε , m_X , m_g — математические ожидания помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, полезного и суммарного сигналов $g(i\Delta t)$ соответственно; $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $r_{X\varepsilon}$ — взаимно корреляционная функция и коэффициент корреляции между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$.

Однако, когда наступает скрытый период незаметного изменения сейсмостойкости морских платформ, эстакад и коммуникаций, условия (1) нарушаются [3–5]:

$$\omega_{T_0} [g(i\Delta t)] \neq \omega_{T_1} [g(i\Delta t)], D_\varepsilon \neq 0, D_g \neq D_X,$$

$$R_{gg}(\mu) \neq R_{xx}(\mu), m_g \neq m_x, R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \neq 0, r_{X\varepsilon} \neq 0.$$

При этом период нормального состояния T_0 заканчивается и начинается период T_1 . В результате из-за нарушения равенства (1) статистические оценки сигнала $g(i\Delta t)$ определяются с некоторой погрешностью. По этой причине в течение периода времени T_1 в системах контроля технического состояния платформ, эстакад и других морских нефтегазодобывающих объектов затрудняется своевременное обнаружение начальной стадии вышеуказанных процессов [2—6]. Затем завершается период T_1 , и наступает период времени T_2 , когда процессы начинают приобретать явно выраженную форму. В известных системах контроля рассматриваемых объектов нарушение их сейсмостойкости регистрируется в основном в период времени T_2 .

По указанным причинам результаты мониторинга сейсмостойкости морских стационарных платформ оказываются запоздалыми. Поэтому для регистрации этих процессов в период времени T_1 необходимо создание технологии и системы, позволяющей уловить момент нарушения равенств (1). Это позволит обнаружить скрытый начальный период изменения сейсмостойкости морских стационарных платформ.

Технологии помехомониторинга начала времени зарождения аномальных сейсмических процессов

Проведенные исследования показали, что в начале времени T_1 нарушения сейсмостойкости морских объектов нефтегазодобычи в первую очередь меняются дисперсия помехи D_ε , оценки значения помехокоэффициента $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$, взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ и коэффициента корреляции $r_{X\varepsilon}$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ [3—6]. В связи с этим рассмотрим возможный вариант приближенного вычисления этих оценок.

Прежде всего, отметим, что в работе [6] для оценки значения помехокоэффициента $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ и взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ получены следующие выражения:

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \{g(i\Delta t)g(i\Delta t) - [g(i\Delta t)g(i+1)\Delta t + g(i\Delta t)g(i+2)\Delta t - g(i\Delta t)g(i+3)\Delta t - D_{\varepsilon\varepsilon}]\}; \quad (2)$$

$$R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) \approx R_{gg}(\mu = 0) - [R_{gg}(\mu = 1) + R_{gg}(\mu = 2) - R_{gg}(\mu = 3)]. \quad (3)$$

Проведенные эксперименты показали, что в начале времени T_1 резко изменяются значения оценок $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$, и они становятся носителями диагностической информации об изменении сейсмостойкости.

Эти эксперименты также показали, что при мониторинге сейсмостойкости оценку дисперсии помехи D_ε также можно использовать в качестве одного из надежных индикаторов. Это связано с тем, что

в начале временного интервала T_1 оценки характеристик помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ как при наличии корреляции между сигналами $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$, так и при ее отсутствии резко меняются. При этом для случая, когда $R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx 0$, оценку дисперсии помехи D_ε можно определить по формуле [4, 5]

$$D_\varepsilon = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g(i+2)\Delta t - 2g(i\Delta t)g(i+1)\Delta t]. \quad (4)$$

Понятно, что зная оценку D_ε , можно также определить оценку дисперсии полезного сигнала D_x по выражению

$$D_x = D_g - D_\varepsilon.$$

Определение оценки дисперсии помехи D_ε и взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ по выражениям (2), (4) возможно только для случая, когда между сигналами $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ нет корреляции. Для их вычисления при наличии корреляции необходимо создание технологии определения оценки релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$. Кроме того, для повышения надежности и достоверности результатов мониторинга начала времени T_1 оценку релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ также целесообразно применять в качестве носителя диагностической информации. В связи с вышеуказанным рассмотрим этот вопрос более подробно. Для этого введем следующие обозначения:

$$\text{sgn } g(i\Delta t) = \begin{cases} 1 & \text{при } g(i\Delta t) > 0; \\ 0 & \text{при } g(i\Delta t) = 0; \\ -1 & \text{при } g(i\Delta t) < 0; \end{cases};$$

$$\text{sgn } x(i\Delta t) = \begin{cases} 1 & \text{при } x(i\Delta t) > 0; \\ 0 & \text{при } x(i\Delta t) = 0; \\ -1 & \text{при } x(i\Delta t) < 0; \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)\varepsilon(i+\mu)\Delta t \neq 0 & \text{при } \mu = 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn } g(i\Delta t)\varepsilon(i+\mu)\Delta t = 0 & \text{при } \mu \neq 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) \neq 0 & \text{при } \mu = 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i+\mu)\Delta t = 0 & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases}$$

Тогда формулу для определения оценки релейной корреляционной функции $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ при на-

личии корреляции между сигналами $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}^*(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t)[X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} X(i\Delta t)X(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) = \\ &= R_{XX}^*(\mu = 0) + R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0). \end{aligned} \quad (5)$$

Из литературы [5–9] известно, что для случая, когда имеет место корреляция между сигналами $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$, можно считать справедливыми следующие выражения:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta R_{gg}^*(\mu = 0) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) &\neq \\ \neq \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 2); \\ \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 4) &\approx 0; \\ \Delta R_{XX}^*(\mu = 1) - \Delta R_{XX}^*(\mu = 2) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 2) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) &\approx \\ \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 3) - \Delta R_{gg}^*(\mu = 4) &\approx 0. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

С учетом введенных обозначений и выражений (5) и (6) нетрудно показать, что оценку релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ можно определить из формулы

$$\Delta R_{gg}^*(\mu = 0) \approx R_{XX}^*(\mu = 0) + R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0), \quad (7)$$

где

$$R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 0) - R_{XX}^*(\mu = 0). \quad (8)$$

Отсюда следует, что для вычисления $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ необходимо определить оценку $R_{XX}^*(\mu = 0)$. С учетом равенств (6) данную оценку можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} R_{XX}^*(\mu = 0) &\approx R_{XX}^*(\mu = 1) + \Delta R_{XX}^*(\mu = 1) \approx \\ &\approx R_{gg}^*(\mu = 1) + \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) \approx R_{gg}^*(\mu = 1) + \\ &\quad + [R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2)] = \\ &= 2R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2). \end{aligned} \quad (9)$$

И, следовательно, выражение (8) можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0) &= R_{gg}^*(\mu = 0) - [2R_{gg}^*(\mu = 1) - \\ &- R_{gg}^*(\mu = 2)] = R_{gg}^*(\mu = 0) - 2R_{gg}^*(\mu = 1) + \\ &\quad + R_{gg}^*(\mu = 2). \end{aligned} \quad (10)$$

Итак, выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} g(i\Delta t)g(i\Delta t) - \\ &- 2\operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \operatorname{sgn} g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)]. \end{aligned} \quad (11)$$

Как было показано выше, по выражению (4) возможно вычисление оценки D_ε при $R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx 0$. Однако при наличии корреляции между сигналами $X(i\Delta t)$ и $\varepsilon(i\Delta t)$ применение этого выражения невозможно. В связи с этим более подробно рассмотрим возможности определения D_ε при $R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \neq 0$ с использованием оценок $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$, $\Delta R_{gg}(\mu = 0)$ и $\Delta R_{gg}^*(\mu = 0)$.

Принимая во внимание условие (6) и равенства (7)–(11), можно записать:

$$R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0) + \Delta R_{XX}^*(\mu = 0) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu = 0);$$

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) + \Delta R_{XX}(\mu = 0) \approx \Delta R_{gg}(\mu = 0);$$

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) + \Delta R_{gg}(\mu = 1) \approx \Delta R_{gg}(\mu = 0).$$

Из [5] известно, что из соотношений между оценками $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$; $R_{XX}^*(\mu = 1)$ и $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$; $\Delta R_{XX}(\mu = 1)$, а также из соотношений между оценками $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$; $\Delta R_{gg}^*(\mu = 1)$ и $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$; $\Delta R_{gg}(\mu = 1)$ можно допустить справедливость приближенных равенств:

$$\frac{R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)}{\Delta R_{XX}^*(\mu = 1)} \approx \frac{R_{X\varepsilon}(\mu = 0)}{\Delta R_{XX}(\mu = 1)},$$

$$\frac{R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)}{\Delta R_{gg}^*(\mu = 1)} \approx \frac{R_{X\varepsilon}(\mu = 0)}{\Delta R_{gg}(\mu = 1)}.$$

При этом получим равенство

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0)\Delta R_{gg}^*(\mu = 1) \approx R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)\Delta R_{gg}(\mu = 1).$$

Следовательно, для случая, когда между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ имеет место корреляция, оценку $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ можно определить по формуле

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx \frac{R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)\Delta R_{gg}(\mu = 1)}{\Delta R_{gg}^*(\mu = 1)}.$$

Понятно, что после определения оценки $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ оценку дисперсии помехи D_ε можно определить как по выражению

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &= R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) \approx \\ &\approx \Delta R_{gg}(\mu = 0) - \Delta R_{gg}(\mu = 1) - R_{X\varepsilon}(\mu = 0), \end{aligned}$$

так и по выражению

$$D_\varepsilon = R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) - R_{X\varepsilon}(\mu = 0),$$

где $R_{X\varepsilon\varepsilon}$ определяется по формуле (3).

Робастная технология идентификации технического состояния и сейсмостойкости морских объектов нефтегазодобычи

Для решения задачи идентификации сейсмостойкости морских платформ, эстакад и коммуникаций прежде всего рассмотрим возможности применения для этой цели методов теории случайных процессов. Известно, что состояние сейсмостойкости сооружений в период времени T_1 в общем случае описывается матричными уравнениями типа [1, 4]

$$\mathbf{R}_{XY}(\mu) = \mathbf{R}_{XX}(\mu)\mathbf{W}(\mu), \quad \mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{R}_{XX}(\mu) = \begin{pmatrix} R_{XX}(0) & R_{XX}(\Delta t) & \dots & R_{XX}[(N-1)\Delta t] \\ R_{XX}(\Delta t) & R_{XX}(0) & \dots & R_{XX}[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{XX}[(N-1)\Delta t] & R_{XX}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{XX}(0) \end{pmatrix}; \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_{XY}(\mu) = [R_{XY}(0) \ R_{XY}(\Delta t) \ \dots \ R_{XY}[(N-1)\Delta t]]^T; \quad (14)$$

$$\mathbf{W}(\mu) = [W(0) \ W(\Delta t) \ \dots \ W((N-1)\Delta t)]^T,$$

где $\mathbf{R}_{XX}(\mu)$ — квадратная симметричная матрица автокорреляционных функций размерностью $N \times N$ центрированного входного сигнала $X(t)$; $\mathbf{R}_{XY}(\mu)$ — вектор-столбец взаимно корреляционных функций между входом $X(t)$ и выходом $Y(t)$; m_X, m_Y — математические ожидания соответственно $X(t), Y(t)$; $\mathbf{W}(\mu)$ — вектор-столбец импульсных переходных функций.

Уравнение (12) и матрицы (13), (14) сформированы из оценок полезных сигналов $X(t)$ и $Y(t)$. Однако при решении реальных задач эти матрицы формируются из оценок технологических параметров, получаемых от датчиков, установленных на соответствующих конструкциях морских платформ, эстакад и коммуникаций, которые представляют собой зашумленные сигналы $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$. Поэтому они содержат погрешности от помех $\varepsilon_1(i\Delta t), \varepsilon_2(i\Delta t), \dots, \varepsilon_m(i\Delta t)$, причем с изменением оценки дисперсии помехи и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой их погрешности меняются. Следовательно, для обеспечения адекватности результатов идентификации технического состояния и сейсмостойкости рассматриваемых морских объектов по матричному уравнению (12) прежде всего необходимо обеспечение робастности оценок элементов этих матриц [1, 5]. Для этого целесообразно примене-

ние технологии вычисления робастных оценок авто- и взаимно корреляционных функций по следующим выражениям:

$$R_{gg}^R(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) - [N^+(\mu) - N^-(\mu)]\langle \Delta\lambda(\mu = 0) \rangle; \quad (15)$$

$$R_{g\eta}^R(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)\eta((i+\mu)\Delta t) - [N^+(\mu) - N^-(\mu)]\langle \Delta\lambda(\mu = 0) \rangle, \quad (16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} |R_{gg}(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 1)| &= \lambda(\mu = 1) \\ |R_{g\eta}(\mu = 1) - R_{g\eta}^*(\mu = 1)| &= \lambda(\mu = 1) \end{aligned} \right\};$$

$$\langle \Delta\lambda(\mu = 1) \rangle = [1/N^-(\mu = 1)]\lambda(\mu = 1).$$

Здесь $R_{gg}(\mu = 1), R_{gg}^*(\mu = 1), R_{g\eta}(\mu = 1), R_{g\eta}^*(\mu = 1)$ являются оценками авто- и взаимно корреляционных функций центрированного и нецентрированного сигналов $g(i\Delta t), \eta(i\Delta t)$ соответственно; $N^+(\mu), N^-(\mu)$ — число произведений $g(i\Delta t)g(i+\mu)\Delta t$ или $g(i\Delta t)\eta(i\Delta t)$ с положительными и отрицательными знаками соответственно.

Естественно, что когда элементы матриц (13), (14) будут формироваться из робастных оценок, по выражениям (15), (16) матричное уравнение (13) можно представить в виде

$$\mathbf{R}_{g\eta}^R(\mu) \approx \mathbf{R}_{gg}^R(\mu)\mathbf{W}(\mu), \quad \mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t. \quad (17)$$

При этом элементы матриц $\mathbf{R}_{gg}^R(\mu), \mathbf{R}_{g\eta}^R(\mu)$ представляют собой робастные оценки зашумленных сигналов:

$$\mathbf{R}_{gg}^R(\mu) = \begin{pmatrix} R_{gg}^R(0) & R_{gg}^R(\Delta t) & \dots & R_{gg}^R[(N-1)\Delta t] \\ R_{gg}^R(\Delta t) & R_{gg}^R(0) & \dots & R_{gg}^R[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{gg}^R[(N-1)\Delta t] & R_{gg}^R[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{gg}^R(0) \end{pmatrix}; \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_{g\eta}^R(\mu) = [R_{g\eta}^R(0) \ R_{g\eta}^R(\Delta t) \ \dots \ R_{g\eta}^R[(N-1)\Delta t]]^T. \quad (19)$$

Согласно работам [4, 5], при вычислении корреляционной функции по выражениям (15), (16) погрешности от помех практически исключаются из робастных оценок элементов матриц (18), (19). Благодаря этому можно считать справедливым равенство

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(\mu) &= [W'(0) \ W'(\Delta t) \ \dots \ W'[(N-1)\Delta t]]^T; \\ W'(0) &\approx W(0), \ W'(\Delta t) \approx W(\Delta t), \ \dots, \\ W'[(N-1)\Delta t] &\approx W[(N-1)\Delta t]. \end{aligned}$$

Следовательно, при идентификации сейсмостойкости морских платформ и эстакад по матричному уравнению (17) можно предположить, что адекватность полученных результатов будет удовлетворительной.

Однако в системах контроля реальных морских объектов нефтегазодобычи, как правило, для диагностики их технического состояния применяются различные датчики, у которых сигналы на выходах отражают разные физические величины (вибрации, давления, перемещения и т. д.). Из-за этого оценки корреляционных функций сигналов $g_1(i\Delta t)$, $g_2(i\Delta t)$, ..., $g_n(i\Delta t)$ требуется привести к безразмерным величинам.

Это осуществляется путем применения процедуры нормирования элементов матрицы (13), (14), (18), (19) [1, 4, 5]. При этом только значения автокорреляционной функции при нулевом временном сдвиге $\mu = 0$ оказываются безошибочными. Во всех остальных же случаях, т. е. при временных сдвигах $\mu \neq 0$, для оценок автокорреляционных функций и при всех временных сдвигах μ для оценок взаимно корреляционных функций нормирование, к сожалению, приводит к появлению дополнительной погрешности от помехи. При этом в случае, когда имеется корреляция между полезным сигналом и помехой, погрешность оценки в результате нормирования в еще большей степени приводит к неадекватности решения вышеуказанных задач. В связи с этим необходимо создание технологии, обеспечивающей исключение погрешности оценок, возникающих в результате нормирования.

Робастная технология нормирования оценок авто- и взаимно корреляционных функций

Как следует из вышеуказанного, для обеспечения адекватности результатов мониторинга и идентификации изменения сейсмостойкости морских стационарных платформ необходима разработка технологии, ориентированной на устранение погрешности, возникающей в результате помехи, которая возникает при нормировании оценки корреляционной функции как в случае, когда отсутствует корреляция между полезным сигналом и помехой, так и в случае ее наличия.

Рассмотрим один из возможных вариантов решения этой задачи. Известно, что нормированные авто- и взаимно корреляционные функции полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$ вычисляются по формулам [1]

$$r_{XX}(\mu) = R_{XX}(\mu)/D(x); \quad (20)$$

$$r_{XY}(\mu) = R_{XY}(\mu)/\sqrt{D(X)D(Y)}; \quad (21)$$

$$D(x) = R_{XX}(0), \quad D(y) = R_{YY}(0),$$

где $R_{XX}(\mu)$, $R_{XY}(\mu)$ оценки авто- и взаимно корреляционных функций, оценки дисперсий сигналов $X(t)$, $Y(t)$; $\mu = 0$, $\mu = \Delta t$, $\mu = 2\Delta t$, $\mu = 3\Delta t$,

Соответственно, нормированные авто- и взаимно корреляционные функции $r_{gg}(\mu)$, $r_{g\eta}(\mu)$ зашумленных сигналов, состоящих из суммы случайных полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$ и соответствующих помех $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$, т. е.

$$g(t) = X(t) + \varepsilon(t), \quad \eta(t) = Y(t) + \varphi(t),$$

вычисляются по формулам

$$r_{gg} = R_{gg}(\mu)/D(g), \quad (22)$$

$$r_{g\eta}(\mu) = R_{g\eta}(\mu)/\sqrt{D(g)D(\eta)}, \quad (23)$$

где

$$R_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t));$$

$$R_{g\eta}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)\eta((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(Y((i+\mu)\Delta t) + \varphi((i+\mu)\Delta t)). \quad (24)$$

Здесь $D(g) = R_{gg}(0)$, $D(\eta) = R_{g\eta}(0)$ — оценки дисперсий сигналов $g(t)$, $\eta(t)$; m_g , m_η — математические ожидания $g(t)$, $\eta(t)$.

Сравнивая выражения (20)—(21) с выражениями (22)—(23), можно заметить, что оценки нормированных авто- и взаимно корреляционных функций полезных сигналов значительно отличаются от оценок нормированных авто- и взаимно корреляционных функций зашумленных сигналов, т. е.

$$r_{gg}(\mu) \neq r_{XX}(\mu); \quad (25)$$

$$r_{g\eta}(\mu) \neq r_{XY}(\mu). \quad (26)$$

Поэтому необходимо создание таких робастных технологий вычисления оценок нормированных авто- и взаимно корреляционных функций $r_{gg}^R(\mu)$, $r_{g\eta}^R(\mu)$, которые обеспечили бы выполнение равенств

$$r_{gg}^R(\mu) \approx r_{XX}(\mu), \quad r_{g\eta}^R(\mu) \approx r_{XY}(\mu)$$

как для случая, когда имеется корреляция между полезными сигналами и помехами, так и в случае, когда корреляция равна нулю.

Для этого сначала рассмотрим источники погрешности, которые возникают при вычислении оценок нормированных корреляционных функций.

Примем во внимание, что значения $\varepsilon(i\Delta t)$ и $\varepsilon((i+\mu)\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ не коррелируют между собой, т. е.

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) \approx 0 \text{ при } \mu \neq 0,$$

и среднее значение квадратов значений помехи равно оценке дисперсии $D(\varepsilon)$ помехи $\varepsilon(i\Delta t)$:

$$D(\varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t).$$

Тогда при наличии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ при временном сдвиге $\mu = 0$ и отсутствии ее при $\mu \neq 0$ будут справедливы соотношения

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \neq 0, R_{\varepsilon X}(\mu = 0) \neq 0, \\ R_{X\varepsilon}(\mu \neq 0) = 0, R_{\varepsilon X}(\mu \neq 0) = 0. \end{aligned}$$

Выражение для вычисления $R_{gg}(\mu)$ можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \\ &= R_{XX}(\mu = 0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + D(\varepsilon), \end{aligned} \quad (27)$$

$$R_{gg}(\mu \neq 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i + \mu)\Delta t) = R_{XX}(\mu \neq 0),$$

где

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t).$$

Из формулы (27) очевидно, что при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой погрешность оценки корреляционной функции при $\mu = 0$ равна сумме дисперсии $D(i\Delta t)$ помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ и удвоенной оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$. При всех остальных временных сдвигах $\mu \neq 0$ оценки автокорреляционной функции $R_{gg}(\mu \neq 0)$ зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ совпадают с оценками автокорреляционной функции $R_{XX}(\mu \neq 0)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$:

$$R_{gg}(\mu \neq 0) \approx R_{XX}(\mu \neq 0).$$

При этом в результате нормирования при нулевом временном сдвиге $\mu = 0$ нормированные корреляционные функции как полезного сигнала $X(i\Delta t)$, так и зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ совпадают и равны единице:

$$r_{XX}(\mu = 0) = r_{gg}(\mu = 0) = 1.$$

С учетом выражений (20), (22), (27) очевидно, что при $\mu \neq 0$ формула определения оценки нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ имеет вид

$$\begin{aligned} r_{gg}(\mu \neq 0) &= \\ &= \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{D(g)} = \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{R_{XX}(\mu = 0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + D(\varepsilon)}. \end{aligned}$$

Таким образом, при наличии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ оценки

нормированной автокорреляционной функции $r_{gg}(\mu \neq 0)$ зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ при временных сдвигах $\mu \neq 0$ отличаются от оценок нормированной автокорреляционной функции $r_{XX}(\mu \neq 0)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$ на удвоенную величину взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ и величину дисперсии помехи $D(i\Delta t)$ в подкоренном выражении знаменателя. Из-за этого имеет место неравенство (25).

Из формулы (24) очевидно, что оценки взаимно корреляционных функций $R_{g\eta}(\mu)$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$ при отсутствии корреляции между полезными сигналами $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ и помехами $\varepsilon(i\Delta t)$, $\varphi(i\Delta t)$, а также между самими помехами $\varepsilon(i\Delta t)$ и $\varphi(i\Delta t)$, т. е. при выполнении условий

$$R_{X\varepsilon}(\mu) \approx 0, R_{Y\varphi}(\mu) \approx 0, R_{\varepsilon\varphi}(\mu) \approx 0,$$

при всех временных сдвигах практически совпадают с оценками взаимно корреляционной функции $R_{XY}(\mu)$ полезных сигналов, т. е. выполняется равенство

$$R_{g\eta}(\mu) \approx R_{XY}(\mu).$$

Однако при наличии корреляции между полезными сигналами $X(i\Delta t)$, $Y(t)$ и помехами $\varepsilon(i\Delta t)$, $\varphi(t)$ при временных сдвигах $\mu = 0$ и $\mu \neq 0$ имеют место соотношения

$$\begin{aligned} R_{Y\varphi}(\mu = 0) \neq 0, R_{\varphi Y}(\mu = 0) \neq 0, \\ R_{Y\varphi}(\mu \neq 0) = 0, R_{\varphi Y}(\mu \neq 0) = 0. \end{aligned}$$

При этом формула (23) вычисления оценок нормированных взаимно корреляционных функций приобретает вид

$$\begin{aligned} r_{g\eta}(\mu) &= \frac{R_{g\eta}(\mu)}{\sqrt{D(g)D(\eta)}} = \\ &= \frac{R_{g\eta}(\mu)}{\sqrt{[D(X) + 2R_{X\varepsilon}(0) + D(\varepsilon)][D(Y) + 2R_{Y\varphi}(0) + D(\varphi)]}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Следовательно, оценки нормированной взаимно корреляционной функции $r_{g\eta}(\mu)$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$ при всех временных сдвигах μ отличаются от оценок нормированной взаимно корреляционной функции $r_{XY}(\mu)$ полезных сигналов $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ на удвоенную величину взаимно корреляционных функций $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $R_{Y\varphi}(\mu = 0)$ и величину дисперсий помех $D(\varepsilon)$, $D(\varphi)$ в подкоренном выражении знаменателя. Из-за этого имеет место неравенство (26).

При наличии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ формулу вычисления робастных оценок нормированных автокорреляционных функций при временных сдвигах $\mu = 0$, $\mu = \Delta t$, $\mu = 2\Delta t$, $\mu = 3\Delta t$, ... можно представить в виде

$$r_{gg}^R(\mu) = \begin{cases} 1 & \text{при } \mu = 0; \\ \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{gg}(0) - R_{X\varepsilon\varepsilon}(0)} & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases} \quad (29)$$

Для случая, когда имеется корреляция между полезными сигналами $X(t)$, $Y(t)$ и помехами $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$, формулу (28) определения робастных оценок нормированной взаимно корреляционной функции $r_{g\eta}^R(\mu)$ при временных сдвигах $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ можно представить в виде

$$r_{g\eta}^R(\mu) = R_{g\eta}(\mu) / \sqrt{(D(g) - D_\varepsilon)} \sqrt{(D(\eta) - D_\varphi)},$$

или

$$r_{g\eta}^R(\mu) = \frac{R_{g\eta}(\mu)}{\sqrt{[R_{gg}(0) - R_{X\varepsilon\varepsilon}(0)][R_{\eta\eta}(0) - R_{g\varphi\varphi}(0)]}}. \quad (30)$$

Таким образом, применение разработанной робастной технологии при вычислении оценок по выражениям (29), (30) практически исключает погрешности нормирования, вызванные помехами как при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой, так и при ее отсутствии. В результате появляется возможность формирования корреляционных матриц из оценок нормированных корреляционных функций, в которых устранена погрешность от влияния помехи.

Благодаря этому для случая, когда технологические параметры морских объектов нефтегазодобычи представляют собой различные физические величины, для обеспечения адекватности полученных результатов задачу идентификации целесообразно решить с помощью матричного уравнения вида

$$\mathbf{Y}_{g\eta}^R(\mu) = \mathbf{r}_{g\eta}^R(\mu)\mathbf{W}(\mu), \quad \mu(\Delta t) = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t, \quad (31)$$

где

$$\mathbf{Y}_{gg}^R(\mu) = \begin{pmatrix} r_{gg}^R(0) & r_{gg}^R(\Delta t) & \dots & r_{gg}^R[(N-1)\Delta t] \\ r_{gg}^R(\Delta t) & r_{gg}^R(0) & \dots & r_{gg}^R[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{gg}^R[(N-1)\Delta t] & r_{gg}^R[(N-2)\Delta t] & \dots & r_{gg}^R(0) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{r}_{g\eta}^R(\mu) = [r_{g\eta}^R(0) \ r_{g\eta}^R(\Delta t) \ \dots \ r_{g\eta}^R((N-1)\Delta t)];$$

$$\mathbf{W}^*(\mu) = [W^*(0) \ W^*(\Delta t) \ \dots \ W^*((N-1)\Delta t)]^T.$$

При этом применение предложенной технологии нормирования элементов этих матриц по выражениям (29), (30) практически исключает погрешности от помех.

Следовательно, можно считать справедливым следующее равенство:

$$\mathbf{W}^*(0) \approx \mathbf{W}(0), \quad \mathbf{W}^*(\Delta t) \approx \mathbf{W}(\Delta t), \quad \dots, \\ \mathbf{W}^*((N-1)\Delta t) \approx \mathbf{W}((N-1)\Delta t).$$

Благодаря этому можно допустить, что адекватность результатов идентификации по матричному уравнению (31) будет совпадать с результатом, полученным из уравнения (12).

Заключение

В работе рассматривается возможность решения проблемы контроля микроизменений и диагностики начальной стадии скрытого периода изменений сейсмостойкости морских стационарных платформ во время частых маломощных землетрясений и ураганных штормов.

1. Учитывая специфику формирования зашумленных сигналов в период землетрясений и штормов с ураганными ветрами и ливневыми дождями, для контроля и мониторинга скрытого периода нарушения сейсмостойкости в рассматриваемых технологиях предлагается использовать помеху как носитель диагностической информации.

2. При решении задач с применением статистических методов идентификации технического состояния сейсмостойкости морских платформ, эстакад и других объектов из-за отличий единиц измерения различных технологических параметров, получаемых от соответствующих датчиков, возникает необходимость путем нормирования привести их к безразмерной величине. Эта процедура осуществляется делением вычисленных оценок на дисперсию зашумленного сигнала. При этом, кроме начальной точки корреляционной функции при нулевом временном сдвиге $\mu = 0$, во все остальные точки вносятся дополнительные погрешности. Это связано с тем, что в оценках этих точек в делителе из суммарной дисперсии необходимо вычесть величину дисперсии помехи. В используемых в настоящее время технологиях при нормализации, к сожалению, это не учитывается. В результате это приводит к значительным отклонениям полученных нормированных оценок от истинных значений. Предлагаемая технология позволяет путем вычитания из делителя величины помехокорреляции устранить указанную разность. Благодаря этому при применении предлагаемой технологии значительно уменьшаются погрешности конечных результатов решения задач мониторинга, диагностики и идентификации технического состояния морских стационарных платформ и эстакад.

3. При мониторинге микроизменений сейсмостойкости морских стационарных платформ оценки характеристик зашумленных сигналов и их помех, получаемых при начальном исходном состоянии их сейсмостойкости, можно принять за эталонные, и сформировать для них соответствующие матрицы. В процессе мониторинга сейсмостойкости при маломощных землетрясениях и штормах текущие оценки сравниваются с эталонными. Если их отличие превосходит некоторый пороговый уровень, тогда можно допустить, что состояние объекта перешло во временной интервал T_1 .

Список литературы

1. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М.: Мир, 1989. 516 с.
2. Алиев Т. А., Ализаде Т. А., Таирова Х. С. Гибридная система контроля и диагностики состояния морских платформ // Нефтяное хозяйство. 2000. С. 29–31.

3. **Алиев Т. А.** Робастная технология контроля сейсмостойкости объектов морских нефтегазовых месторождений // Нефтяное хозяйство. 2001. № 3. С. 66—68.

4. **Алиев Т.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. Kluwer Academic. Plenum Publishers, New York, 2003. 199 p.

5. **Алиев Т.** Digital noise monitoring of defect origin. London: Springer, 2007. 223 p.

6. **Алиев Т. А., Аббасов А. М., Ализаде А. А., Етирмишли Г. Д., Гулуев Г. А., Пашаев Ф. Г.** Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 22—28.

7. **Алиев Т. А., Ализаде Т. А., Аббасов А. А.** Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process. International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub. No WO2006/130933, International Filing Date — December 19, 2005.

8. **Алиев Т. А., Аббасов А. М., Алиев Э. Р., Гулуев Г. А.** Method for monitoring and forecasting earthquakes. Eurapian Asian patent

No 011003. International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub. No WO2007/143799, International Filing Date — June 16, 2006.

9. **Алиев Т. А., Аббасов А. М., Алиев Э. Р., Гулуев Г. А.** Цифровая технология и система получения и анализа информации от глубинных пластов земли с целью помехомониторинга технического состояния социально-значимых объектов // Автоматика и вычислительная техника. 2007. № 2. С. 3—15.

10. **Алиев Т. А., Аббасов А. М.** Digital Technology and the system of interference monitoring of the technical state of consractive objects, and the system of the signaling of abnormal seismic processes // Automatic Control and Computer Sciences. Allerton Press, Inc., New York. 2005. № 6. P. 3—10.

11. **Алиев Т. А., Алиев Н. С.** Устройство для диагностики стационарных стохастических объектов. Авторское свидетельство № 1084746. Заявитель: Институт кибернетики АН АзССР, заявка № 3391677, приоритет изобретения 27.05.1982 г. Зарегистрировано в Госреестре изобретений СССР 8.12.1983 г.

УДК 556.155:556.161:556.166.2:627.81

Г. Г. Оруджов, канд. техн. наук, зав. отд.,
gazanfar.orujov@gmail.com,

А. А. Алиева, диссертант,
depart7@iit.ab.az,

Н. В. Расулова, зав. сектором,
asnarmah@gmail.com,

Институт информационных технологий
Национальной академии наук Азербайджана, г. Баку

Система автоматического управления объемом воды в водохранилище с применением элементов ГИС-технологий

Рассмотрены некоторые вопросы разработки системы автоматического управления объемом воды с использованием альтернативных датчиков информации о количестве воды в водохранилище — измерителей глубины и площади зеркала водоема. Глубина и площадь зеркала водоема при наличии карты рельефа дна водохранилища позволяют определить объем воды в водоеме. Приведены примеры расчета объема воды в водохранилище в зависимости от глубины и площади зеркала водоема.

Ключевые слова: водохранилище, рациональное управление водными ресурсами, система автоматического управления объемом воды, желаемый объем воды

Введение

Известно, что человечество с древних времен борется с аномальными природными явлениями (катастрофами) с помощью имеющихся у него средств. Статистика, собранная за период 1965—1999 гг., показывает, что к наиболее распространенным среди произошедших катастроф можно отнести тропические штормы, землетрясения, наводнения и засуху. При этом суммарная доля наводнений и засухи составляет 41 % [1].

Всемирная конференция по природным катастрофам, состоявшаяся в мае 1994 г. в Июкогаме (Япония), приняла декларацию, в которой сказано, что борьба, направленная на уменьшение ущерба от природных катастроф, должна быть важным элементом государственной стратегии всех стран в достижении устойчивого развития [2]. Конференция обратилась ко всем странам с призывом перейти на новую стратегию борьбы с природными катастрофами, основанную на прогнозировании и предупреждении.

Аккумулирующие свойства водохранилищ могут позволить осуществить оптимальное регулирование уровня воды в речном русле посредством управления уровнем воды в самом водохранилище. Поэтому для рационального управления водными ресурсами в качестве основного инструмента используются водохранилища.

Многие проблемы эксплуатации водохранилищ связаны с их функционированием в экстремальных условиях, т. е. с выработкой правил использования запасов воды в маловодные периоды и с пропуском высоких вод в периоды паводков/половодий. Учитывая наводнения (происходящие преимущественно весной), приносящие колоссальный ущерб окружающей среде и инфраструктуре, трудно переоценить значение оптимального управления уровнем воды в водохранилищах. Управление водными ресурсами водохранилищ представляет собой неотъемлемый атрибут регулирования речного стока. Рационализация управления водохранилищами приносит ощутимый дополнительный эффект, иногда сравнимый с эффектом от строительства новых или от реконструкции существующих водохранилищ [3].

Водные ресурсы относятся к числу важнейших факторов экономического и социального развития страны, поэтому актуальность решения вопросов управления водными ресурсами обусловлена не только их научной, но и большой социально-экономической значимостью.

Состояние проблемы управления объемом воды в водохранилищах

Существует ряд принципов, на основании которых разрабатываются системы управления водными ресурсами, одним из которых является принцип интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР). Главная цель принципа ИУВР — устойчивое, стабильное, справедливое и равноправное обеспечение водными ресурсами водопользователей и природы [4–6]. Системы, созданные по принципам ИУВР, призваны решать также проблемы, связанные с трансграничностью рек [7]. Другим принципом является комплексность управления водными ресурсами [8], предусматривающая учет различных аспектов для предотвращения паводковых ситуаций, например таких, как охрана лесных массивов на склонах горного рельефа земной поверхности, очищение от осадков дельты реки и т. д.

Существуют также модели оптимального управления водными ресурсами, где основным критерием оптимальности может являться выработка максимальной электроэнергии [9] или уменьшение мощности паводков [10].

Известны также системы рационального использования водных ресурсов [10, 11]. В наиболее совершенной из них, предложенной в работе [10], инструментом, обеспечивающим рациональное использование водных ресурсов водохранилищ, служат правила управления, подразделяющиеся на правила *диспетчерского* и *оперативного* управления [3]. Правила *диспетчерского управления* позволяют осуществлять управление функционированием водохранилищ в условиях неопределенности гидрологической информации при отсутствии заблаговременного и точного прогноза, а правила *оперативного управления* позволяют достигать большого эффекта управления при наличии краткосрочного гидрологического прогноза.

Управление водохранилищами по правилам диспетчерского управления осуществляется на основе наблюдений за текущим состоянием всех элементов водохозяйственной системы. Поэтому эксплуатация водохранилищ по этим правилам связана с мониторингом уровней и объемов водохранилищ, а также участков русел рек [7, 8, 12].

Однако перечисленные системы вместе с достоинствами имеют общие недостатки, а именно, они не учитывают геоморфологическую модель земной коры, модели рельефа земной поверхности речного бассейна, движение воды на поверхности Земли. Перечисленные системы также не обеспечивают прогнозирование желаемого объема воды в водохранилище с учетом гидрометеорологического прогноза (краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного) в бассейне водозабора реки. Наличие адекватных геоморфологической модели земной коры и моделей рельефа земной поверхности речного бассейна и движения воды на земной поверхности, также гидрометеорологического прогноза

позволит прогнозировать объем предстоящего поступления воды в водохранилище. Наличие информации об объеме ожидаемой для поступления в водохранилище в предстоящем периоде воды, ожидаемом объеме расхода и текущем объеме воды в водохранилище позволит вычислить желаемый (оптимальный) объем воды в водохранилище на предстоящий период. Возможность прогнозирования желаемого объема воды в водохранилище позволила бы осуществить разработку системы автоматического управления объемом воды в водохранилище, которая минимизировала бы возможность возникновения критических ситуаций, связанных с засухой и половодьем.

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам автоматического управления количеством воды в водохранилищах. Существующие системы управления обеспечивают автоматический сброс высоких вод из водохранилища в целях предотвращения прорыва дамбы [3].

Система автоматического управления объемом воды в водохранилище

Суть метода автоматического управления объемом воды в водохранилищах, предлагаемого в данной статье, заключается в поддержании объема воды на желаемом уровне.

Следует отметить, что датчика информации, прямо указывающего на количество (запас) воды в водохранилище, не существует. Существует датчик уровня воды в водохранилище, также можно получить информацию о площади зеркала водохранилища, предоставляемую от искусственных спутников дистанционного зондирования Земли. В статье рассматривается вопрос автоматического управления объемом воды в водохранилищах с использованием данных альтернативных датчиков информации о количестве воды в водохранилищах.

Структурно-функциональная схема системы автоматического управления объемом воды в водохранилище (САУ ОБВ) приведена на рис. 1.

Основными элементами САУ ОБВ являются:

- ♦ *объект управления* (ОУ) в виде водохранилища с управляемым объемом воды V_c , поступающим в него количеством воды за единицу времени X_g (данная переменная является наблюдаемой, но неуправляемой) и передаточной функцией:

$$W_B(s) = \frac{k_B}{p},$$

где $k_B = \text{const}$ — коэффициент усиления;

- ♦ *задающее устройство* (ЗУ), обеспечивающее гидрометеорологический прогноз и генерацию желаемого объема воды V_a с учетом геоморфологической модели земной коры, моделей рельефа земной поверхности речного бассейна и движения воды на земной поверхности;

- ♦ информационно-измерительное устройство (ИИУ), содержащее два канала и обеспечивающее расчет по известным эмпирическим выражениям

$$V_c = f_H(H_c), \quad V_c = f_S(S_c),$$

текущего объема воды водохранилища V_c на основе информации об уровне H_c или площади поверхности (зеркала) S_c воды водохранилища, получаемой с датчиков уровня (ДУВ) и поверхности (ДПВ) соответственно;

- ♦ управляющее устройство (УУ), обеспечивающее управление объемом воды V_c в водохранилище по принципу обратной связи путем подключения к ОУ посредством коммутатора К одного из каналов ИИУ и измерения отклонения текущего объема воды V_c от желаемого V_a :

$$e = V_a - V_c.$$

Данное управление реализуется посредством сработки из водохранилища объема воды X_x — количества израсходованной воды за единицу времени в зависимости от текущего объема воды V_c :

$$X_x = f_e(e) = \begin{cases} X_{\min} & \text{при } e > (V_a - V_{\min}); \\ k_y e & \text{при } (V_c - V_{\min}) \leq e \leq (V_c - V_{\max}); \\ X_{\max} & \text{при } e < (V_a - V_{\max}), \end{cases}$$

где $k_y = \text{const}$ — коэффициент усиления УУ; X_{\min} и X_{\max} — соответственно минимальный и максимальный объемы спускаемой (расходуемой) воды из водохранилища за единицу времени; V_{\min} и V_{\max} — соответственно минимально и максимально допустимые объемы воды в водохранилище.

Модель динамики системы автоматического управления объемом воды в водохранилище

На основе структурно-функциональной схемы САУ ОВВ (рис. 1) нетрудно получить следующее дифференциальное уравнение, описывающее ее

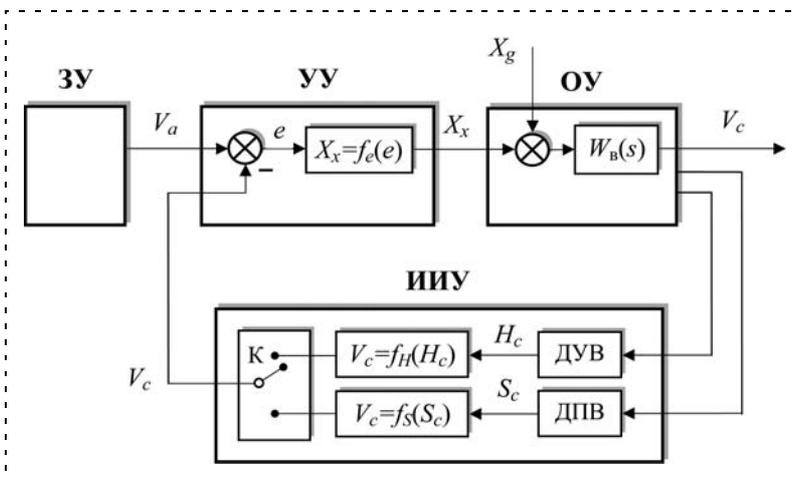


Рис. 1. Структурно-функциональная схема системы автоматического управления объемом воды в водохранилище

динамику в переменных "текущий объем воды V_c — требуемый объем воды V_a ":

$$\dot{V}_c(t) = k_b f_e(V_a(t) - V_c(t)) + X_g(t), \quad (1)$$

где

$$f_e(V_a - V_c) = \begin{cases} X_{\min} & \text{при } V_c > V_{\min}; \\ k_y (V_a - V_c) & \text{при } V_{\min} \leq V_c \leq V_{\max}; \\ X_{\max} & \text{при } V_c < V_{\min}. \end{cases}$$

Решение данного дифференциального уравнения проводили методом численного дифференцирования Рунге—Кутты.

Для расчета текущего объема воды в водохранилище V_c по результатам измерения текущего уровня поверхности его воды относительно уровня мирового океана H_c можно использовать следующее приближенное равенство:

$$V_c = f_H(H_c) \approx \sum_{k=1}^n (H_c - P_k) E U, \quad (2)$$

где P_k — высота дна водохранилища, соответствующая k -му пикселю относительно уровня мирового океана; E и U — расстояние, соответствующее ширине и длине пикселя, а k и n — номер и число пикселей, отражающих поверхность водохранилища.

Следует отметить, что при высоких волнах на поверхности водохранилища измерение глубины имеет недопустимо большую погрешность. В таких случаях для определения объема воды в водохранилище предлагается использование спутниковых снимков водохранилища [13] с приемлемой частотой съема информации (рис. 2, см. вторую сторону обложки). В этом случае для расчета объема воды в водохранилище может быть использовано следующее приближенное равенство:

$$V_c = f_S(S_c) \approx \frac{S_c}{n} S_c \sum_{k=1}^n (H_c - P_k), \quad (3)$$

где S_c — текущее значение площади поверхности водохранилища, вычисленное с помощью космического снимка; H_c — уровень воды в водохранилище в момент дистанционного зондирования со спутника изображения поверхности водохранилища; P_k — высота дна водохранилища, соответствующая k -му пикселю относительно уровня мирового океана; k и n — номер и число пикселей, отражающих поверхность водохранилища в изображении.

На рис. 3 приведены зависимости $H_c = f(V_c)$ и $S_c = f(V_c)$, вычисленные с использованием соответственно формул (2) и (3), для водохранилища Мингячевир (Азербайджан, 226 км к западу от г. Баку), а на рис. 4 — зависимость $S_c = f(H_c)$ для

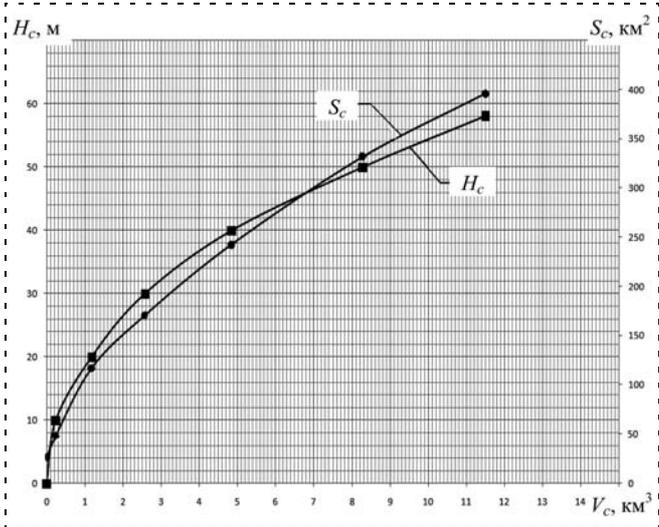


Рис. 3. Зависимости $H_c = f(V_c)$ и $S_c = f(V_c)$ для водохранилища Мингячевир

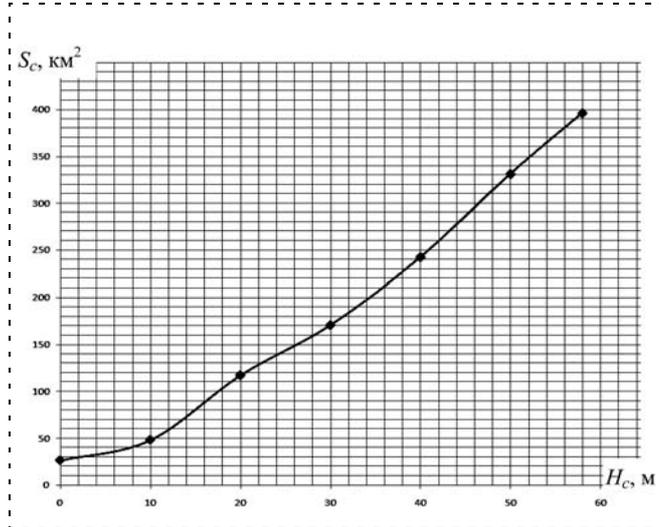


Рис. 4. Зависимость $S_c = f(H_c)$ для водохранилища Мингячевир

данного водохранилища, информация о которой может дать дополнительные сведения о текущем состоянии окрестности и дна водохранилища.

Компьютерное моделирование системы автоматического управления объемом воды водохранилища Мингячевир

Численный эксперимент проведен на примере водохранилища Мингячевир [14–17].

На рис. 5 приведены результаты моделирования, показывающие динамику спуска воды из водохранилища с начального объема $V_c(t_{\text{нач}}) = 11\,000$ млн м^3 до конечного объема $V_c(t_{\text{кон}}) = 5\,000$ млн м^3 при скорости спуска воды, равной $150\,000$ $\text{м}^3/\text{сут}$. Здесь кривые 1, 2 — графики изменения $V_c(t)$; кривые 3, 4 — графики изменения $\dot{V}_c(t)$ соответственно без ограничения и с ограничением на скорость спуска воды из водохранилища (с учетом нелинейного элемента $f_c(V_a - V_c)$); прямая 5 — конечный объем воды в водохранилище.

На рис. 6 представлены результаты моделирования, отражающие поведение САУ объемом воды в водохранилище, где кривые 1 и 2 — соответственно графики изменения желаемого $V_a(t)$ и текущего $V_c(t)$ объемов воды в водохранилище.

Результаты компьютерного моделирования системы показали следующее:

- чтобы спустить $6\,000$ млн м^3 воды без ограничения на скорость спуска (рис. 5, кривая 3) из водохранилища потребуется примерно 21 сут. (рис. 5, кривая 1), а этого допускать нельзя, так как на-

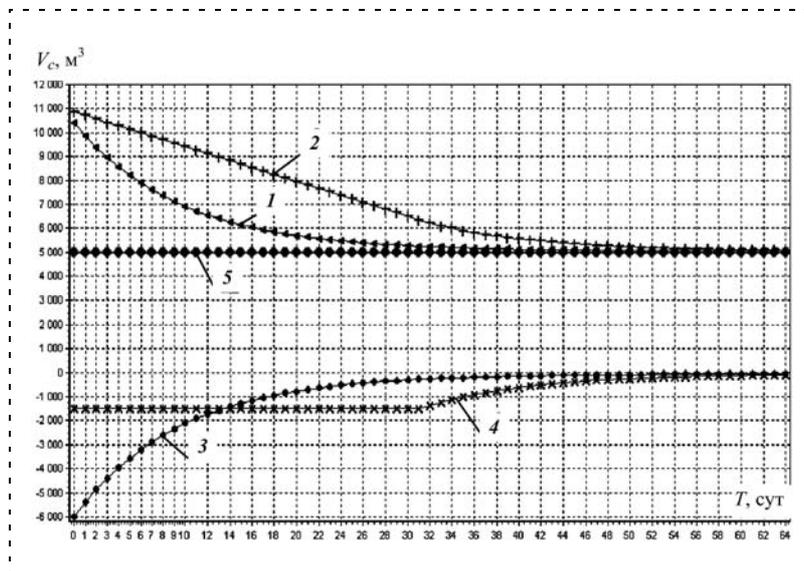


Рис. 5. Переходные процессы спуска воды из водохранилища

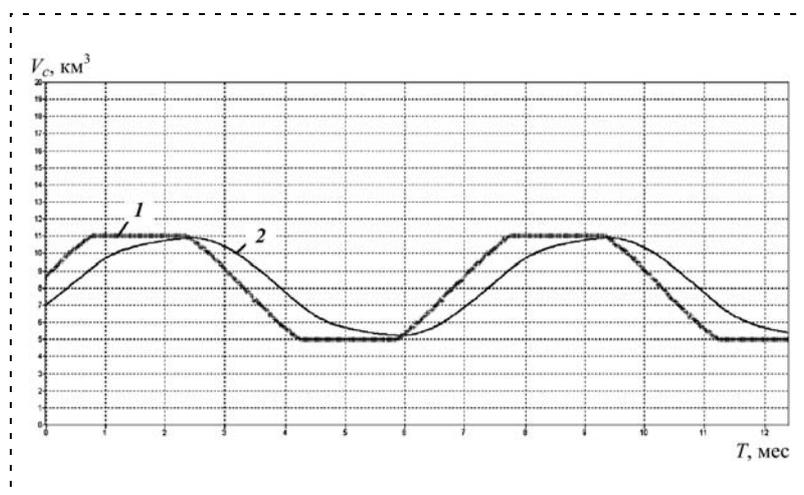


Рис. 6. Результаты моделирования, отражающие динамику САУ ОБВ

чальная скорость спуска воды из водохранилища слишком большая (600 000...500 000 м³/сут.);

- чтобы спустить 6000 млн м³ воды при пропускной способности реки ниже водохранилища не более 150 000 м³/сут. (рис. 5, кривая 4) требуется примерно 38 сут. (рис. 5, кривая 2);
- предлагаемая САУ ОВВ обеспечивает отслеживание желаемого объема воды с опозданием не более 20 сут., что вполне приемлемо с учетом среднесрочного гидрометеорологического прогноза.

Выводы

1. Предложена структурная схема модели системы автоматического управления объемом воды в водохранилище.

2. Для управления объемом воды наряду с традиционным датчиком информации о глубине воды в водохранилище, предложен альтернативный датчик информации о площади поверхности водохранилища на основании космических снимков.

3. Проведен численный эксперимент по моделированию системы автоматического управления объемом воды в водохранилище на примере водохранилища Мингячевир.

Список литературы

1. **Осипов В. И.** Природные катастрофы на рубеже XXI века // Вестник РАН. 2001. Т. 71. № 4. С. 291—302. URL: <http://vivovoco.rsl.ru/vv/iournal/vran/cata/cata.htm>

2. **Yokohama Strategy and Plan of Action for a Safer World. Guidelines for Natural Disaster Prevention, Preparedness and Mitigation** // World Conference on Natural Disaster Reduction. Yokohama, Japan, 23—27 May, 1994. Unated Nations, New York and Geneva, 1995.

3. **Пряжинская В. Г., Ярошевский Д. М., Левит-Гуревич Л. К.** Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. М.: Физматлит, 2002. 494 с.

4. **Казибек Н.** Краткая оценка процесса интегрированного управления водными ресурсами по Азербайджанской Республике // Проект "Реализация принципов интегрированного управления водными ресурсами в странах Центральной Азии и Кавказа, 2004. С. 128. URL: www.cawater-info.net/library/rus/gwp/iwrm2004_r.pdf

5. **Реализация принципов интегрированного управления водными ресурсами в странах Центральной Азии и Кавказа** // Global Partnership Central Asia and Caucasus. 2004. 128 с. URL: http://www.cawater-info.net/library/rus/gwp/iwrm2004_r.pdf

6. **Казибек Н.** Интегрированное управление водными ресурсами в Азербайджане // Доклады науч.-практич. семинара НАТО "Интегрированное управление водными ресурсами на трансграничных бассейнах — межгосударственные и межсекторальные подходы" (г. Бишкек, 23—27 февраля 2004 г.). С. 7. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/almaty2004/kazibekov.pdf>

7. **Сотрудничество по трансграничным водам: Тенденции в новых независимых государствах** // CE/MP.WAT/16. Европейская экономическая комиссия. Серия публикаций по водным проблемам. 2006. № 4. С. 125. URL: http://www.unec.org/env/water/publications/documents/waterseries4_r.pdf

8. **Совместная программа по управлению реками. Бассейн реки Кура. Приложение. Пилотный проект по мониторингу и оценке качества трансграничных вод в целях реализации положений международных правовых актов. Итоговый отчет, февраль 2004 г. С. 134. URL: <http://www.iointrivers.org/files/fmal/rus/Vol3.pdf>**

9. **Козицын А. С.** Об оптимальном управлении уровнем воды в водохранилище // Тр. XIII Байкальской междунар. школы-семинара. Т. 5. Моделирование технических и природных систем. Иркутск-Северобайкальск, 2—8 июля 2005 г. С. 167—172. URL: <http://www.sbras.ru/interval/Conferences/Baikal-2005>

10. **Иванов Я. М.** О некоторых частных задачах модели управления водными ресурсами в период паводков. Там же. С. 149—156. URL: <http://www.sbras.ru/interval/Conferences/Baikal-2005>

11. **Косолапов А. Е.** Совершенствование процесса управления водными ресурсами бассейна реки на основе автоматизированных информационно-советующих систем: Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 1996. 50 с.

12. **Совместная программа по управлению реками. Бассейн реки Кура. Приложение. Пилотный проект по мониторингу и оценке качества трансграничных вод в целях реализации положений международных правовых актов. Итоговый отчет. Февраль 2004 г. С. 184. URL: <http://www.iointrivers.org/files/fmal/rus/Vol4a.pdf>**

13. **Чандра А. М., Гош С. К.** Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 328 с.

14. **Техническое перевооружение Мингечаурской ГЭС. Проект. Т. 1. Природные условия. Кн. 1. Гидрологические условия и климат. Топографо-геодезическое обоснование.** Баку: Бакинское отд. Всесоюзн. проектно-изыскат. науч.-исслед. объединения "ГИДРОПРОЕКТ" им. С. Я. Жука, 1983. 146 с.

15. **Процессы заиления Мингечаурского водохранилища на реке Кура.** Баку: Изд. Ин-та географии АН Азербайджанской ССР, 1982. 170 с.

16. **План эксплуатации Мингечаурского гидроузла на реке Кура на период 1991—1995 гг. Гидрологическая характеристика. 712-Т2.** Баку: Бакинское отд. Всесоюзн. проектно-изыскат. науч.-исслед. объединения "ГИДРОПРОЕКТ" им. С. Я. Жука, 1991. 113 с.

17. **План эксплуатации Мингечаурского гидроузла на реке Кура на период 1991—1995 гг. Гидрологическая характеристика. 712-Т1.** Баку: Бакинское отд. Всесоюзн. проектно-изыскат. науч.-исслед. объединения "ГИДРОПРОЕКТ" им. С. Я. Жука, 1991. 119 с.

УДК 007.51

С. А. Айвазян, канд. техн. наук, гл. науч. сотр.,
sergey_asa@inbox.ru,
4 ЦНИИ МО РФ

Алгоритм системы автоматизированного визирования и сопровождения объектов (целей) с использованием информации о направлении взгляда человека-оператора

Рассматривается алгоритм квазиоптимального оценивания параметров движения объекта (цели) с учетом информации о направлении взгляда человека-оператора. Приведены результаты экспериментальных эргономических исследований систем визирования и сопровождения объектов с использованием информации о направлении взгляда человека-оператора.

Ключевые слова: системы автоматизированного визирования и сопровождения объектов (целей), линии взгляда, модуль оценки параметров движения целей, квазиоптимальные оценки параметров движения целей, визуальное активное управление, полунатурный моделирующий комплекс

Вопросы построения системы автоматизированного визирования и сопровождения объектов (целей), основанной на использовании информации о направлении взгляда человека-оператора, являются в настоящее время весьма актуальными. Недостатки эргатических традиционных визирных систем давно обсуждаются в специальной литературе, посвященной этому вопросу. Однако преимущества систем визирования, основанных на направлении взгляда, по нашему мнению, недостаточно подтверждены экспериментально. Поэтому назрела необходимость экспериментального подтверждения основных достоинств этих систем.

Особенности функционирования эргатических систем визирования объектов (целей)

Наиболее естественным способом визирования объекта (цели) человеком является зрительный способ. Поэтому при построении человеко-машинных систем визирования (сопровождения) целей всегда было стремление конструкторов использовать именно его. Однако отсутствие надежных способов съема информации о направлении взгляда

человека препятствовало реализации этого стремления. В настоящее время разработаны оптические и биоэлектрические способы съема информации о направлении взгляда человека [5].

Исследования основных принципов построения систем визирования, основанных на использовании информации о направлении взгляда человека-оператора показывают, что такие системы могут быть эффективны там, где возможность управления визирной линией другими способами ограничена (занятость конечностей другими управляющими функциями, воздействие неблагоприятных факторов профессиональной деятельности и др.).

Способности человека по непрерывному многокоординатному слежению за объектом посредством движений головы и глаз ограничены. Такое слежение человеку свойственно осуществлять лишь эпизодически.

Об исключительности глаза как исполнительного органа в контуре управления системы визирования объектов в сравнении с обычными видами управляющих движений конечностями свидетельствует ряд его свойств: высокое быстродействие и высокая точность фиксации глаз на объекте; легкость и точность захвата и слежения за целью, характеристики движения которой (скорость, вид траектории, частота смены направления) делают ее сопровождение неэффективным в случае использования традиционных технических органов и систем управления — кноппелей, механизмов управления перекрестием, рукояток и т. д. Указанные свойства визирования, сопровождения целей подтверждаются экспериментально.

Весьма актуальной задачей является задача построения систем визирования объектов (целей), в которых бы использовались уникальные по точности и по быстродействию возможности зрительного способа визирования цели, основанного на использовании информации о направлении взгляда человека, и парировались бы недостатки зрительного способа визирования, связанного с проблемой постоянного (непрерывного) удержания взгляда на цели. Решение этой задачи может быть осуществлено путем применения автоматизированных способов визирования, обеспечивающих автоматическую поддержку процесса визирования целей в периоды, когда человек-оператор переводит взгляд на другие объекты.

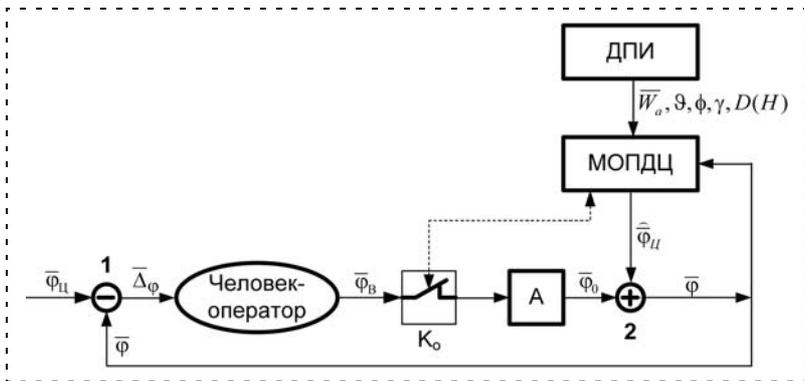


Рис. 1. Структурная схема системы автоматизированного визирования подвижного объекта

При реализации систем визирования (углового сопровождения) объекта-цели, основанных на использовании информации о направлении взгляда человека-оператора, существенное повышение уровня автоматизации процесса визирования может быть достигнуто алгоритмической поддержкой процесса сопровождения цели, основанной на использовании алгоритмов оптимального (квазиоптимального) оценивания.

Алгоритм автоматизированного визирования

Выходная информация алгоритма оценивания через некоторое время с момента начала сопровождения цели может обеспечить автоматическое программное сопровождение цели. При этом роль человека-оператора сводится к периодической коррекции взглядом процесса сопровождения цели. Таким образом, реализуется так называемый программно-корректируемый процесс сопровождения цели.

Принципы построения системы автоматизированного визирования подвижного объекта, основанной на использовании зрительно-активного управления (ЗАУ), т. е. управления, основанного на информации о направлении взгляда, и методов квазиоптимального оценивания, можно пояснить с помощью структурной схемы, представленной на рис. 1.

На этой схеме обозначены:

$\Phi_{ц} = [\varphi_{цy} \ \varphi_{цz}]^T$ — вектор углов отклонения линии цели от продольной оси OX летательного аппарата;

$\hat{\Phi}_{ц} = [\hat{\varphi}_{цy} \ \hat{\varphi}_{цz}]^T$ — вектор оценок углов отклонения линии цели от продольной оси OX летательного аппарата (поступает с выхода алгоритмического модуля оценивания параметров движения цели (МОПДЦ));

$\Phi_{в} = [\varphi_{вy} \ \varphi_{вz}]^T$ — вектор углов отклонения линии направления взгляда от продольной оси OX летательного аппарата;

"ДПИ" — датчики полетной информации;

$W_a, \vartheta, \phi, \gamma, D(H)$ — соответственно вектор земной скорости летательного аппарата (ЛА), углы тан-

гажа, рыскания и крена, дальность цели (или высота ЛА над целью);

K_0 — выключатель; включен — когда человек-оператор визирует с помощью окулографического сигнала цель; выключен — когда оператор не визирует цель (или визирует цель с большими ошибками);

$\Phi_0 = [\varphi_{0y} \ \varphi_{0z}]^T$ — вектор углов $\varphi_{0y}, \varphi_{0z}$, равных результату преобразования углов $\varphi_{вy}, \varphi_{вz}$ с помощью оператора A вида

$$\varphi_{0y} = k_1 \varphi_{вy} + k_2 \int_{t_0}^t \varphi_{вy} dt',$$

$$\varphi_{0z} = k_1 \varphi_{вz} + k_2 \int_{t_0}^t \varphi_{вz} dt',$$

где k_1, k_2 — коэффициенты, соответственно, слагаемых управления визирной маркой по положению и по скорости;

$\varphi = [\varphi_y \ \varphi_z]^T$ — вектор углов отклонения линии визирования от продольной оси OX ЛА (углов отклонения визирной марки), равных

$$\varphi_y = K_0 \varphi_{0y} + \hat{\varphi}_{цy},$$

$$\varphi_z = K_0 \varphi_{0z} + \hat{\varphi}_{цz},$$

где $K_0 = 1$, когда человек-оператор визирует цель, $K_0 = 0$ — когда человек-оператор не визирует цель (или визирует цель с большими ошибками).

В модуле МОПДЦ проводится квазиоптимальное оценивание параметров движения цели [1–4].

В данной статье рассматривается алгоритм квазиоптимального оценивания параметров движения объекта (цели) с учетом информации о направлении взгляда человека-оператора:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{X}_{ц}(t)}{dt} &= A_{ц}(t)X_{ц}(t) - L_{W_{ц}}(t) + \\ &+ B[Z_{ц}(t) - \varphi_{ц}(x_{эи}, \hat{X}_{ц}, t)]; \\ \hat{X}_{ц}(t_0) &= m_{x0}; \\ B &= RC^*TQ^{*-1}; \\ \frac{dR}{dt} &= A_{ц}R + RA_{ц}^T - BC^*R + G^*, R(t_0) = \theta_{x0}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где

$$C^* = \frac{\partial \varphi_{ц}(x_{эи}, X_{ц})}{\partial X_{ц}};$$

Q^* — матрица интенсивностей шума

$$\left\{ N_{ц}(t) - \frac{\partial \varphi_{ц}(x_{эи}, X_{ц}, t)}{\partial x_{эи}} N_{x_{эи}} \right\};$$

G^* — матрица интенсивности шума — $N_{L_{W_{ц}}}$;

$$\mathbf{X}_{ц} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{ц(g)} \\ \mathbf{W}_{ц(g)} \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{ц} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{E} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{L}_{W_{ц}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{a(g)} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{D}_{ц(g)}$ — вектор дальности цели, представленный через проекции на оси нормальной системы координат, обозначенной индексом g ;

$\mathbf{W}_{ц(g)}$ — вектор земной (путевой) скорости цели;

$\mathbf{W}_{a(g)}$ — вектор земной скорости атакующего ЛА, определяемый навигационной системой с ошибками Δ_{W} . На выходе навигационной системы наблюдается измеряемый сигнал $\mathbf{W}_{a(g)u} = \mathbf{W}_{a(g)} + \mathbf{N}_{W}$;

\mathbf{N}_{W} — вектор гауссовых центрированных белых шумов измерения вектора $\mathbf{W}_{a(g)}$ с известной матрицей интенсивностей $\mathbf{Q}_{W}(t)$;

$$\mathbf{Z}_{ц} = [\mathbf{D}^* \ \varphi_{By}^* \ \varphi_{Bz}^*]^T = \varphi_{ц}(\chi_{э}(t), \mathbf{X}_{ц}(t)) + \mathbf{N}_{ц}(t):$$

$$\varphi_{ц}(\chi_{э}, \mathbf{X}_{ц}) = \begin{bmatrix} D \\ \varphi_{By} \\ \varphi_{Bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D = \sqrt{D_{xg}^2 + D_{yg}^2 + D_{zg}^2} \\ \arcsin\left(\frac{a_{31}D_{xg} + a_{32}D_{yg} + a_{33}D_{zg}}{D}\right) \\ -\arcsin\left(\frac{a_{21}D_{xg} + a_{22}D_{yg} + a_{23}D_{zg}}{D}\right) \end{bmatrix};$$

$$a_{21} = \sin \phi \sin \gamma - \cos \phi \sin \vartheta \cos \gamma; \quad a_{22} = \cos \vartheta \cos \gamma;$$

$$a_{23} = \cos \phi \sin \gamma + \sin \phi \sin \vartheta \cos \gamma;$$

$$a_{31} = \sin \phi \cos \gamma + \cos \phi \sin \vartheta \sin \gamma;$$

$$a_{32} = -\cos \vartheta \sin \gamma; \quad a_{33} = \cos \phi \cos \gamma - \sin \phi \sin \vartheta \sin \gamma;$$

$\mathbf{N}_{ц}(t)$ — вектор гауссовых центрированных белых шумов измерения $D, \varphi_{By}, \varphi_{Bz}$ с известной матрицей интенсивностей

$$\mathbf{Q}_{ц}(t) = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Вектор $\chi_{э} = [\vartheta \ \phi \ \gamma]^T$ — вектор не полностью определенных параметров, измеряется с ошибками. На выходе измерителей наблюдается измеренный сигнал

$$\chi_{эи} = \chi_{э} + \mathbf{N}_{\chi_{э}},$$

где $\mathbf{N}_{\chi_{э}}$ — вектор гауссовых центрированных белых шумов измерения вектора $\chi_{э}(t)$ с известной матрицей интенсивностей $\mathbf{Q}_{\chi_{э}}(t)$.

Алгоритм (1) оценивания параметров движения объекта (цели) построен при гипотезе о движении цели с постоянным вектором скорости $\mathbf{W}_{ц(g)}$.

В результате вычислений в соответствии с алгоритмом оценивания параметров движения наземной цели определяются квазиоптимальные оценки вектора скорости цели $\mathbf{W}_{ц(g)}$ и вектора дальности цели $\mathbf{D}_{ц(g)}$, которые могут использоваться для решения задачи прицеливания при применении авиационных средств поражения.

На основании оценки вектора дальности цели $\mathbf{D}_{ц(g)}$ вычисляются квазиоптимальные оценки $\hat{\varphi}_{цy}$, $\hat{\varphi}_{цz}$ углов визирования цели $\varphi_{цy}$, $\varphi_{цz}$, необходимые для реализации автоматизированного сопровождения цели с использованием информации о направлении взгляда:

$$\hat{\varphi}_{ц} = \varphi_{ц}(\chi_{эи}, \hat{\mathbf{X}}_{ц}, t) = \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_{цz} \\ \hat{\varphi}_{цy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\arcsin\left(\frac{a_{21}\hat{D}_{xg} + a_{22}\hat{D}_{yg} + a_{23}\hat{D}_{zg}}{D \cos \varphi_{By}}\right) \\ \arcsin\left(\frac{a_{31}\hat{D}_{xg} + a_{32}\hat{D}_{yg} + a_{33}\hat{D}_{zg}}{\hat{D}}\right) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где

$$\hat{D} = \sqrt{\hat{D}_{xg}^2 + \hat{D}_{yg}^2 + \hat{D}_{zg}^2}.$$

Функционирование системы автоматизированного визирования цели, структурная схема которой изображена на рис. 1, происходит следующим образом.

Человек-оператор, обнаружив цель и приняв решение на ее визирование (сопровождение), нажимает кнопку разовой команды ($K_0 = 1$) и совмещает путем управления своим взглядом визирную марку и цель. При сопровождении таким образом цели человек-оператор измеряет углы $\varphi_{цy}$, $\varphi_{цz}$. Измеренные значения φ_{By} , φ_{Bz} углов визирования цели $\varphi_{цy}$, $\varphi_{цz}$ поступают вместе с измеренной с помощью датчиков полетной информации "ДПИ" $\mathbf{W}_a, \vartheta, \phi, \gamma, D(H)$ на вход модуля квазиоптимального оценивания параметров движения цели "МОПДЦ", функционирующего в соответствии с алгоритмом (1). Алгоритм модуля МОПДЦ начинает работать в режиме фильтрации параметров движения цели. Квазиоптимальные оценки $\hat{\varphi}_{цy}$, $\hat{\varphi}_{цz}$ углов визирования цели $\varphi_{цy}$, $\varphi_{цz}$, вычисленные по формуле (3), поступают на сумматор "2", облегчая человеку-оператору слежение за целью, сводя его действия к корректирующим действиям.

В случае необходимости перекинуть взгляд на другие объекты человек-оператор отпускает кнопку разовой команды ($K_0 = 0$) и, тем самым, пере-

Сравнительная оценка способов визирования объектов

водит алгоритм (1) в режим экстраполяции движения цели. При этом в алгоритме оценивания элементам q_{22} , q_{33} матрицы (2) назначаются большие положительные значения, которые практически обеспечивают обнуление соответствующих элементов матрицы \mathbf{B} в выражении (1), и, тем самым, алгоритм переводится в режим экстраполяционного (программного) сопровождения цели. При возвращении вновь человека-оператора к выполнению функций сопровождения цели он нажимает кнопку разовой команды, переводя алгоритм (1) в режим оценивания.

В случае, когда человек-оператор по каким-либо причинам не сообщил машинной части системы о своем намерении переключения взгляда на другие объекты (путем отпускания кнопки разовой команды) или о своем намерении вновь осуществлять визирование цели (путем вторичного нажатия кнопки разовой команды), алгоритм квазиоптимального оценивания способен автоматически обнаружить намерения человека-оператора и в соответствии с ними создать сигнал $K_0 = 0$ или $K_0 = 1$. Это достигается путем анализа значения элементов вектора невязки $\mathbf{Z}_{ц}(t) - \Phi_{ц}(\chi_{эи}, \hat{\mathbf{X}}_{ц}, t)$ в уравнениях (1).

В случае, когда абсолютная величина одного из элементов $\varphi_{ву} - \hat{\varphi}_{цу}$ или $\varphi_{вз} - \hat{\varphi}_{цз}$ вектора невязки $\mathbf{Z}_{ц}(t) - \Phi_{ц}(\chi_{эи}, \hat{\mathbf{X}}_{ц}, t)$ превысит, соответственно, определенное положительное число $\delta_y = 3k\sigma_{\Delta y}$ или $\delta_z = 3k\sigma_{\Delta z}$ (где k — положительное число, $\sigma_{\Delta y}$, $\sigma_{\Delta z}$ — среднеквадратические отклонения соответственно ошибок углового сопровождения человеком-оператором цели по каналу "у" и по каналу "z"), алгоритм оценивания (1) переходит в состояние экстраполяции движения цели, размыкаются контакты " K_0 ", и переменной K_0 присваивается значение, равное нулю. В случае же, когда вновь абсолютные величины элементов $\varphi_{ву} - \hat{\varphi}_{цу}$ и $\varphi_{вз} - \hat{\varphi}_{цз}$ вектора невязки $\mathbf{Z}_{ц}(t) - \Phi_{ц}(\chi_{эи}, \hat{\mathbf{X}}_{ц}, t)$ становятся меньше, соответственно, чисел $\delta_y = 3k^*\sigma_{\Delta y}$ или $\delta_z = 3k^*\sigma_{\Delta z}$, где k^* — положительное число, в общем случае не равное k (это свидетельствует о том, что оператор вновь приступил к выполнению задачи сопровождения цели), замыкаются контакты " K_0 ", переменной K_0 присваивается значение, равное единице, алгоритм переводится в режим оценивания.

Рассмотренный алгоритм автоматизации процесса сопровождения объектов-целей с использованием информации о направлении взгляда человека-оператора позволяет строить совершенные автоматизированные системы визирования целей боевых эргатических комплексов различного типа.

Для подтверждения достоинств и недостатков эргатических (с участием человека) традиционных с использованием ручных манипуляторов систем визирования и сопровождения объектов-целей и систем с использованием информации о направлении взгляда человека-оператора со зрительно-активным управлением визирной меткой были проведены экспериментальные эргономические исследования. Эти исследования проводили на программно-аппаратном комплексе моделирования условий деятельности штурмана истребителя-бомбардировщика при обнаружении и угловом сопровождении наземных целей.

Оператору в кабине полунатурного моделирующего комплекса (ПМК) в процессе моделируемого полета ЛА предъявляли видеоизображение земной поверхности, наземных объектов и визирной марки (ВМ). В задачу оператора входило совмещение ВМ с наземной целью. Исследования проводили для двух вариантов управления визирной маркой:

- управления с помощью ручного манипулятора (РМ) — кньюппеля, расположенного на дополнительной ручке штурмана;
- зрительно активного управления (ЗАУ) с использованием сигнала о направлении взгляда оператора.

Для проведения экспериментов на ПМК привлекали двух подготовленных операторов, с которыми были проведены тренировочные моделируемые полеты на ПМК.

Для статистической обработки результатов исследований параметры точности визирования цели, зарегистрированные в процессе эксперимента были разделены на два типа в зависимости от интенсивности углового перемещения изображения наземной цели относительно ЛА:

- первый тип — на участке интенсивных эволюций (ИЭ) относительного углового положения цели, соответствующего движению моделируемого ЛА при выходе на боевой курс;
- второй тип — на участке стабильного прогнозируемого (СП) относительного углового перемещения цели, соответствующего движению моделируемого ЛА на боевом курсе.

Качество деятельности человека-оператора оценивали по характеристикам точности сопровождения визирной маркой цели. Для этого использовали среднеквадратическую ошибку визирования за время полета.

Результаты полунатурных исследований по сравнительной оценке различных способов визирования (ЗАУ и РМ) на участке ИЭ и участке СП представлены на рис. 2.

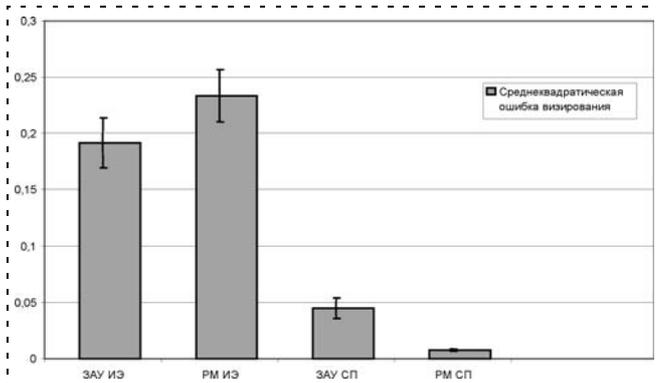


Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка визирования

Способ ЗАУ имеет меньшие на 18 % значения ошибки при решении задач первого типа — задач слежения за интенсивно эволюционирующим объектом. При решении задач второго типа при стабильном прогнозируемом перемещении цели наблюдается противоположная картина.

Можно заключить, что в условиях динамического перемещения объекта наблюдения (как при условиях движения цели в задаче первого типа ИЭ) лучших показателей управления можно достичь способом ЗАУ. Причина этого кроется в возможности использования оператором основных достоинств, присущих этому способу: минимальной инерционности системы "глаз — визирная марка" и высокой точности позиционирования на короткий промежуток времени. При решении задач второго типа, когда от оператора, в первую очередь, требуется

выдерживание статических параметров, управление с использованием ЗАУ затруднено. Здесь проявляется сложность для человека слежения с длительной фиксацией взгляда на мало эволюционирующих объектах.

При решении задач второго типа применение принципов построения системы автоматизированного визирования подвижного объекта позволит устранить необходимость длительной фиксации взгляда на малоподвижном объекте за счет функционирования алгоритма квазиоптимального оценивания параметров движения объекта с учетом информации о направлении взгляда человека-оператора.

Список литературы

1. Айвазян С. А. Проблемные эргономические вопросы построения информационного поля кабины авиационного комплекса нового поколения // Тематический научный сборник. Монино: Изд. ВВА, 2010.
2. Моисеев А. Г. Оптимальное управление конечным состоянием многоступенчатых динамических систем "Самолет-оружие". Науч.-метод. матер. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1995.
3. Моисеев А. Г. Приближенный алгоритм нерасходящегося оптимального фильтра низкого порядка // Тез. докл. V Всесоюзного совещания по статистическим методам в процессах управления. 1981.
4. Краснов А. М., Моисеев А. Г. Квазиоптимальный алгоритм оценивания процесса с измеряемыми параметрами // Автоматика и телемеханика. 1983. № 4. С. 121—125.
5. Разработка принципов управления БЭК с использованием электрофизиологических коррелятов направления взгляда и построение на их основе систем отображения информации и управления БЭК. Отчет по НИР (1-й этап), шифр "Вагонник". ГНИИИ ВМ МО РФ; Научные руководители: профессор, доктор технических наук А. Г. Моисеев, старший научный сотрудник, кандидат технических наук С. А. Айвазян и др. М., 2000.

ИНФОРМАЦИЯ

23—26 апреля 2013 г. в Москве в павильоне № 75 ВВЦ состоится



18-я Московская международная выставка и конференция ПО ТРАНСПОРТУ И ЛОГИСТИКЕ «ТРАНСРОССИЯ»

Выставка логистики — главная площадка, на которой обсуждаются самые актуальные проблемы развития российской транспортной системы, разрабатываются новые информационные системы взаимодействия различных видов транспорта, направленные на успешное решение вопросов логистики на глобальном рынке транспортно-логистических услуг.

Тематические направления:

- ♦ Международное сотрудничество в сфере транспорта. Влияние вступления России в ВТО на транспортную отрасль.
- ♦ Взаимодействие железных дорог с морскими портами. Проекты развития портов.
- ♦ Реформа железнодорожного транспорта в Российской Федерации: состояние, проблемы и перспективы.
- ♦ Взаимодействие грузоперевозчика и грузовладельца.
- ♦ Таможенное оформление. Электронная таможня. Таможенный союз. Развитие пунктов пропуска через госграницу.
- ♦ Развитие транспортной инфраструктуры как основа функционирования транспортной системы.
- ♦ Государственно-частное партнерство в сфере транспорта.
- ♦ Мультимодальные контейнерные перевозки.
- ♦ Транспортно-логистический сектор Балтики.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://www.transrussia.ru/conference.aspx>

Ву Дык Лунг, канд. техн. наук,
декан факультета вычислительной техники,
Университет информационных технологий
Вьетнамского национального университета,
Хо Ши Мин, Вьетнам,

П. И. Падерно, д-р техн. наук, проф.,
pipaderno@list.ru

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина),

Ф. Э. Сатторов, канд. техн. наук,
Председатель РОО "МОСТ", Душанбе, Таджикистан

Человеческий фактор в корпоративных сетях

Часть 3. Системный администратор*

Описана деятельность системного администратора (СА) в корпоративной сети: группы и категории решаемых задач и организация работы группы СА. Проведен анализ возможностей оценки соответствия СА специфике и требованиям конкретной корпоративной сети. Разработан подход и сформирован комплекс критериев, позволяющих формализовать оценку качества деятельности СА на основе имеющихся исходных данных.

Ключевые слова: корпоративная сеть, системный администратор, задачи, критерии оценки

Введение

При эксплуатации корпоративных сетей (КС) особое влияние на успешность (эффективность) их функционирования оказывает системный администратор (СА) или группа СА для крупных КС. В ряде случаев достаточно много нареканий вызывает неэффективная работа КС. При этом руководство организации, в которой эксплуатируется (предполагается эксплуатация) КС, не обладает достаточными знаниями в области информационных технологий, чтобы определить, какой именно СА им нужен. Ввиду дефицита квалифицированных СА зачастую на работу принимают специалиста, имеющего соответствующий диплом и "опыт работы", что может ухудшить работу организации. В данной статье предложен подход к формализованной оценке СА на основе комплекса различных критериев [5, 6].

1. Деятельность системного администратора (группы СА)

1.1. Задачи системного администратора

Цель СА (группы СА) заключается в эффективном управлении КС с учетом специфики организаций.

* Части 1, 2 опубликованы в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" № 10, 11, 2012 соответственно.

Структурное и функциональное описание КС, а также комплекс правил, организующих ее функционирование, могут быть представлены в виде кортежа

$$КС = \langle S, Q, F(B), G, C \rangle,$$

где S — состав и структура КС; Q — информационное и программное обеспечение (ИПО), необходимое для обеспечения функционирования КС и решения необходимых задач; F — множество функций, возлагаемых на КС (B — множество задач); G — СА (группа СА), участвующий в решении задач; C — множество правил и инструкций, по которым функционирует КС, являющаяся составной частью некоторой надсистемы.

Описанные компоненты могут быть представлены в более детализированном виде.

Структура КС: $S = \langle S_1, S_2, S_3 \rangle$, где S_1 — перечень узлов и подсистем (рабочие станции, серверы и другие устройства обработки и передачи информации); S_2 — взаимосвязи между подсистемами и узлами (кабельные, оптоволоконные и беспроводные каналы связи); S_3 — множество автоматизированных рабочих мест (АРМ) группы СА.

Основным инструментом СА для поддержки работы КС является программное обеспечение (ПО). В реальности ИПО приобретает для обеспечения решения задач внешнего и внутреннего характера, которые, по предварительному представлению заказчика, будут решаться с применением технических средств (ТС). После начала эксплуатации КС множество задач существенно корректируется, что приводит к необходимости приобретения и установки дополнительного ПО как системного, так и прикладного.

Информационно-программное обеспечение: $Q = \langle J, Q_1, Q_2, Q_3 \rangle$, где J — информационное обеспечение, необходимое для обеспечения решения конкретных задач, характерных для данной КС; Q_1 — сетевое ПО, предназначенное для обеспечения функционирования системы и поддержки сетевого решения необходимых задач (операционная система, протоколы, драйверы и т. д.); Q_2 — системное ПО, предназначенное для обеспечения функционирования каждого автоматизированного рабочего места (АРМ) и поддержки решения необходимых задач (операционная система и др.); Q_3 — прикладное ПО, предназначенное для решения необходимых задач.

Обычно при обслуживании КС СА выстраивает внутреннюю и внешнюю политику для решения конкретных задач. СА должен обеспечивать как решение внутренних задач (поддержка работоспособности, сетевых периферийных устройств и т. д.), так и решение внешних задач (настройка сети Интернет, WiFi и т. д.).

Все множество задач, решаемых (поддерживаемых) СА, можно разбить на следующие группы: A — поддержка пользователей; B — работа с КС (развитие); C — обеспечение бесперебойной рабо-

ты организации. Каждая из этих групп задач может быть детализирована.

Поддержка пользователей: $A = \langle A_1, A_2, A_3 \rangle$, где A_1 — задачи, связанные с обеспечением удаленной помощи (установка удаленного соединения, выявление причин и устранение неполадок); A_2 — задачи, связанные с инсталляцией нового ПО (приобретение, тестовая инсталляция, установка приобретенного ПО на компьютерах пользователей); A_3 — задачи, связанные с учетными записями (конфигурация учетных записей, создание почтового ящика, присвоение идентификаторов и паролей).

Работа с КС: $B = \langle B_1, B_2, B_3 \rangle$, где B_1 — задачи, связанные с модернизацией системы (выявление узких мест, замена устаревшего оборудования, прокладка, при необходимости, новых участков КС); B_2 — задачи, связанные с мониторингом КС (контроль стабильной работы электронной почты, сети Интернет, наличия системных ресурсов, выявление случаев злоупотребления системой); B_3 — задачи, связанные с обеспечением безопасности (защита от несанкционированного доступа, резервное копирование, защита от вирусов).

Обеспечение работы организации: $C = \langle C_1, C_2, C_3 \rangle$, где C_1 — задачи, связанные с модернизацией технического парка (конфигурация ПК, сборка ПК, ремонт оборудования); C_2 — задачи, связанные с закупкой комплектующих материалов (поиск поставщиков, ведение документооборота, составление плана профилактических работ по обслуживанию дорогостоящего оборудования, выявление и анализ потребностей пользователей); C_3 — задачи, связанные с работой со сторонними организациями (привлечение организаций для выполнения специфических работ, анализ рынка и др.).

Кроме того, возможно разбиение задач по следующим категориям: U — устранение внутренних неполадок; R — организационные задачи; D — устранение внешних неполадок. Каждая из групп перечисленных задач также может быть детализирована и представлена в виде кортежа.

Устранение внутренних неполадок: $U = \langle U_1, U_2, U_3 \rangle$, где U_1 — задачи, связанные с обеспечением работоспособности КС (доступность серверов, поддержка пропускной способности, модернизация и улучшение); U_2 — задачи, связанные с обеспечением работоспособности ПК (работоспособность серверов и ПК (разработчиков, офисных, бухгалтерии и др.)); U_3 — задачи, связанные с обновлением ПО (серверного, специализированного, офисного).

Организационные задачи: $T = \langle T_1, T_2, T_3 \rangle$, где T_1 — задачи, связанные с аналитикой (отчеты о работе, анализ и планирование работ); T_2 — задачи, связанные с работой с сотрудниками (проведение инструктажей, обучение сотрудников, тренинги по информационной безопасности, техниче-

ская поддержка и консультации сотрудников); T_3 — задачи, связанные с совершенствованием КС и повышением квалификации (новое аппаратное ПО, обмен опытом).

Устранение внешних неполадок: $D = \langle D_1, D_2, D_3 \rangle$, где D_1 — задачи, связанные с обеспечением работоспособности веб-сайта компании (организации) (доступность из сети Интернет, актуализация содержимого, реинжиниринг сайта); D_2 — задачи, связанные с обеспечением работоспособности электронной почты (отправка и получение, защита от спама, защита от вирусов); D_3 — задачи, связанные с обеспечением доступа к ресурсам сети Интернет (распределение каналов между пользователями, уменьшение трафика за счет кэширования, фильтрация запросов, ограничение доступа).

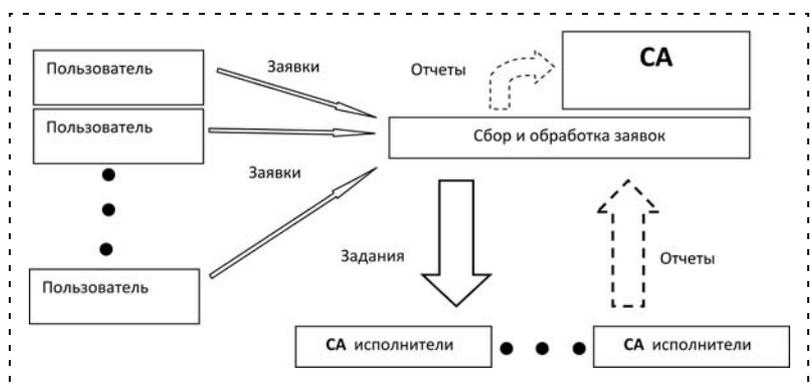
Перечисленный перечень общих и частных задач может быть значительно расширен и дополнен (сокращен) в соответствии со спецификой организации, а структура задач может претерпевать большие изменения.

Необходимо заметить, что разделение на группы или категории является весьма условным и, чаще всего, обусловлено представлениями специалиста, проводящего такое разделение.

1.2. Организация работы группы системного администратора

Эффективность работы КС во многом зависит от организации работы СА (группы СА) по выполнению заявок пользователей. Наиболее часто используемая организация работы СА, весьма эффективная для небольших организаций, заключается в закреплении за подразделениями конкретных членов группы СА. Этот способ распределения заявок пользователей имеет ряд недостатков, один из которых заключается в том, что пользователи имеют непосредственный выход на администраторов нижнего уровня, что может явиться причиной путаницы, так как СА более высокого уровня может не знать о некоторых неполадках в работе КС.

Более удобный способ управления потоком заявок (см. рисунок) исключает возможность прямого выхода пользователей на СА низкого уровня. Все



Управление потоками заявок пользователей

заявки пользователей собираются и упорядочиваются на верхнем уровне (возможно отдельной группой СА) и фиксируются в специальной базе данных.

2. Оценка деятельности системного администратора

Для оценки степени соответствия СА комплексу задач, поставленных перед КС, необходимо сформировать соответствующие показатели, которые могут быть различными по своей целевой направленности. Для оценки качества работы группы СА целесообразно выбрать вероятность правильного решения и среднее время решения каждой задачи для всех членов группы СА. Эти значения используются для дальнейшего анализа и оценки эффективности управления КС, а также при ее оптимизации на всех этапах.

В соответствии с выделенными группами и категориями задач модель соответствия СА требованиям КС можно представить в виде кортежа $S = \langle S_A, S_B, S_C, S_U, S_T, S_D \rangle$, где $S_X = \langle S_{X1}, S_{X2}, \dots, S_{Xn_X} \rangle$ — набор оценок (характеристик), описывающих возможности (способности) ЛПР по успешному решению задач группы (категории) X ($X \in \{A, B, C, U, T, D\}$).

Относительная важность решения (правильного и своевременного) каждой из задач, относящейся к соответствующей группе, в значительной степени зависит от специфики организации, обуславливающей перечень задач, решаемых с помощью КС. Например, конфиденциальность информации имеет большое значение для КС, обеспечивающих функционирование систем организационного и финансового управления, а для КС, поддерживающих массовое обслуживание населения (пенсионные фонды, учреждения социального обеспечения, билетные кассы и др.), на первое место выходит отсутствие сбоев в работе, надежность и т. д.

В силу разнородности задач, решаемых СА, от него требуется не только обязательный набор знаний, умений и навыков, но и интуиция, основанная на опыте, умение работать с разнородными пользователями, общаться с начальством и др. Следует заметить, что руководство организации нередко не представляет *всех* особенностей деятельности СА. При разработке модели СА следует обязательно учитывать его личностные особенности, которые могут быть описаны некоторыми наборами психологических характеристик $\Psi = \langle \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n \rangle$, отражающих его психологический портрет. Наборы психологических характеристик $\Psi_k = \langle \psi_{k1}, \psi_{k2}, \dots, \psi_{kl_k} \rangle$, $\Psi_k \in \Psi$, необходимых СА для конкретной деятельности, могут быть различными в зависимости от задач организации. В ряде случаев эти характеристики значительно влияют на возможности СА по решению конкретных задач. По мнению психологов, личностные особенности должны учитываться всегда. Таким образом, модель СА может быть описана

кортежем $M = \langle K, L \rangle$, где K — множество компетенций (знаний, умений и навыков), L — множество личностных особенностей, имеющих отношение к профессиональной деятельности СА. Несмотря на то, что эти компоненты обуславливают в большинстве случаев успешность деятельности СА, явные взаимосвязи между ними и успешностью деятельности СА в реальной действительности неизвестны.

Для оценки специфики требований, предъявляемых к функционированию конкретной КС, и их реализации в процессе эксплуатации следует:

1) сформировать перечень целей, которые ставятся перед КС;

2) построить *иерархию* показателей, отражающих качество функционирования реальной КС (верхний уровень — категории A, B, C, U, T, D , далее групповые показатели и т. д. до частных показателей нижнего уровня — задач или фрагментов задач z_1, z_2, \dots, z_k);

3) определить относительные приоритеты (коэффициенты значимости) для каждой из категорий A, B, C, U, T, D ($R_A + R_B + R_C + R_U + R_T + R_D = 1$) и далее вниз по иерархии для каждого из уровней, включая нижний уровень из k задач $R_{z_i}, i = 1, 2, \dots, k$;

$\sum_{i=1}^k R_{z_i} = 1$. Определить относительные приоритеты

можно с применением метода анализа иерархий [2]. Полученный вектор значимостей $R = (R_{z_1}, R_{z_2}, \dots, R_{z_k})$ достаточно полно описывает специфику КС.

Вне зависимости от содержания задачи будем полагать, что каждая из оценок качества выполнения данной задачи СА, по аналогии с вероятностью правильного и безошибочного решения задачи, находится на интервале $[0; 1]$. Эти оценки составляют вектор, характеризующий возможности СА по решению выделенных задач $P = (P_{z_1}, P_{z_2}, \dots, P_{z_k})$,

$0 \leq P_{z_i} \leq 1, i = 1, 2, \dots, k$.

При оценке степени соответствия СА специфике КС и формировании требований к СА необходимо учитывать также и частоту (интенсивность) возникновения конкретных задач. Пусть известен вектор $\Lambda = (\lambda_{z_1}, \lambda_{z_2}, \dots, \lambda_{z_k})$ интенсивностей возникновения задач. Введем в рассмотрение вектор характеристик

$g = (g_{z_1}, g_{z_2}, \dots, g_{z_k}), g_{z_i} = R_{z_i} \lambda_{z_i} / \sum_{j=1}^k R_{z_j} \lambda_{z_j}$,

$\sum_{j=1}^k g_{z_j} = 1$, отражающий важности задач и учитывающий интенсивности этих задач.

Используя этот вектор, а также зная оценки характеристик конкретного СА, отражающие его возможности по решению каждой из задач $P = (P_{z_1}, P_{z_2}, \dots, P_{z_k})$, можно сформировать ряд

Таблица 1

Наименование показателя	Учитываемые особенности КС		
	Без учета важности и интенсивности потоков задач	С учетом важности задач, но без учета интенсивности потоков задач	С учетом важности и интенсивности потоков задач
	1	2	3
1. Среднее расстояние до идеала	$W_{111} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (1 - P_{z_i})^2} / k$	$W_{112} = \sqrt{\sum_{i=1}^k R_{z_i} (1 - P_{z_i})^2}$	$W_{113} = \sqrt{\sum_{i=1}^k g_{z_i} (1 - P_{z_i})^2}$
2. Среднее расстояние до начала координат (длина вектора)	$W_{121} = \sqrt{\sum_{i=1}^k P_{z_i}^2} / k$	$W_{122} = \sqrt{\sum_{i=1}^k R_{z_i} P_{z_i}^2}$	$W_{123} = \sqrt{\sum_{i=1}^k g_{z_i} P_{z_i}^2}$
3. Средняя вероятность решения одной задачи из потока (параллельное решение)	$W_{131} = \sum_{i=1}^k P_{z_i} / k$	$W_{132} = \sum_{i=1}^k R_{z_i} P_{z_i}$	$W_{133} = \sum_{i=1}^k g_{z_i} P_{z_i}$
4. Средняя вероятность решения одной задачи из потока (последовательное решение)	$W_{141} = \sqrt{\prod_{i=1}^k P_{z_i}}$	$W_{142} = \prod_{i=1}^k P_{z_i}^{R_{z_i}}$	$W_{143} = \prod_{i=1}^k P_{z_i}^{g_{z_i}}$

Таблица 2

Наименование показателя	Учитываемые особенности КС		
	Без учета важности и интенсивности потоков задач	С учетом важности задач, но без учета интенсивности потоков задач	С учетом важности и интенсивности потоков задач
	1	2	3
1. Среднее расстояние до идеала	$W_{211} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(1 - P_{z_i})^2}{(1 - P_{z_i,зад})^2}} / k$	$W_{212} = \sqrt{\sum_{i=1}^k R_{z_i} \frac{(1 - P_{z_i})^2}{(1 - P_{z_i,зад})^2}}$	$W_{213} = \sqrt{\sum_{i=1}^k g_{z_i} \frac{(1 - P_{z_i})^2}{(1 - P_{z_i,зад})^2}}$
2. Среднее расстояние до нового начала координат (длина вектора)	$W_{221} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(P_{z_i} - P_{z_i,зад})^2}{(1 - P_{z_i,зад})^2}} / k$	$W_{222} = \sqrt{\sum_{i=1}^k R_{z_i} \frac{(P_{z_i} - P_{z_i,зад})^2}{(1 - P_{z_i,зад})^2}}$	$W_{223} = \sqrt{\sum_{i=1}^k g_{z_i} \frac{(P_{z_i} - P_{z_i,зад})^2}{(1 - P_{z_i,зад})^2}}$
3. Средняя вероятность решения одной задачи из потока (параллельное решение)	$W_{231} = \sum_{i=1}^k \frac{P_{z_i} - P_{z_i,зад}}{1 - P_{z_i,зад}} / k$	$W_{232} = \sum_{i=1}^k R_{z_i} \frac{P_{z_i} - P_{z_i,зад}}{1 - P_{z_i,зад}}$	$W_{233} = \sum_{i=1}^k g_{z_i} \frac{P_{z_i} - P_{z_i,зад}}{1 - P_{z_i,зад}}$
4. Средняя вероятность решения одной задачи из потока (последовательное решение)	$W_{241} = \sqrt{\prod_{i=1}^k \left(\frac{P_{z_i} - P_{z_i,зад}}{1 - P_{z_i,зад}} \right)}$	$W_{242} = \prod_{i=1}^k \left(\frac{P_{z_i} - P_{z_i,зад}}{1 - P_{z_i,зад}} \right)^{R_{z_i}}$	$W_{243} = \prod_{i=1}^k \left(\frac{P_{z_i} - P_{z_i,зад}}{1 - P_{z_i,зад}} \right)^{g_{z_i}}$

критериев для оценки степени соответствия СА требованиям, предъявляемым к конкретной КС.

Заметим, что для идеального СА, у которого вектор P состоит из единиц, значение критерия должно быть равно 1.

Для определения уровня подготовки СА возможно использование одного или нескольких (в зависимости от имеющихся исходных данных) критериев W_{ijk} соответствия СА требованиям КС.

В табл. 1 приведены скалярные оценки без наличия ограничений, а в табл. 2 — скалярные оценки при наличии ограничений на квалификацию СА, если заданы ограничения на возможности успешного решения задач: $P_{z_i} \geq P_{z_i,зад}, \forall i \in \overline{1, k}$.

Использование тех или иных критериев для оценки соответствия СА предъявляемым требованиям в значительной степени зависит от наличия исходных данных (от этапа жизни системы обработки информации).

Замечания

1. Оценки, не учитывающие специфику КС, отражают, в общем, уровень соответствия СА требованиям некоторой абстрактной КС, и их можно использовать при оценке уровня квалификации СА.

2. Приведенные критерии обладают рядом следующих особенностей:

2.1. Критерии расстояния являются более статичными, особенно если принять во внимание возможную нелинейность отклонений и различные ресурсные ограничения, что ограничивает возможность их применения. Однако на этапе подбора персонала данные достаточно хорошо отражают квалификацию СА.

2.2. Вероятностные критерии, учитывающие важность и частоту решения задач, практически всесторонне отражают соответствие СА специфическим требованиям конкретной КС. Кроме того, при замене важности решения задачи на доход от ее решения, аддитивные показатели можно трактовать как средний доход (превышение среднего дохода при постановке задачи с ограничениями).

2.3. Критерии, связанные с вероятностями решения задач (последовательное выполнение), отражают возможные неточности и ошибки в работе СА и характеризуют вероятностные аспекты его деятельности (безошибочность и др.).

2.4. СА, лучший по одному из критериев, может быть далеко не лучшим по другому, например, если у СА по одной из задач вероятность ее правильного решения очень мала, то значение критерия W_{223} будет близко к нулю, в то время как значения остальных критериев будут достаточно велики.

2.5. Окончательно выбор критерия для оценки соответствия СА предъявляемым требованиям определяется спецификой организации, функционирование которой поддерживается с помощью рассматриваемой КС.

Подобный подход является весьма полезным для организаций, в которых имеются и эксплуатируются КС.

Список литературы

1. **Информационно-управляющие** человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания: Справочник / под общ. ред. А. И. Губинского, В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 512 с.
2. **Падерно П. И., Попечителев Е. П.** Надежность и эргономика биотехнических систем / Под общ. ред. проф. Е. П. Попечителева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2007. 288 с.
3. **Ву Дык Лунг, Падерно П. И.** Комплексный метод оценки вероятности правильного решения оператором задач в локальных вычислительных сетях // Информатика, управление и компьютерные технологии. Сборник "Известия СПбГЭТУ". 2005. Вып. 2. С. 32–36.
4. **Падерно П. И., Сатторов Ф. Э.** Системный администратор локальной вычислительной сети // Доклады академии наук Республики Таджикистан. Т. 52. 2009. № 6. С. 437–442.
5. **Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э.** Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 1. Модели и оценки // Мехатроника, автоматика и управление. 2012. № 10. С. 38–43.
6. **Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э.** Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 2. Управление // Мехатроника, автоматика и управление. 2012. № 11. С. 41–45.

ИНФОРМАЦИЯ



22–25 апреля 2013 г. в г. Пензе
в Пензенском государственном университете состоится

XXX Международная научно-техническая конференция "ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ – 2013" (ПАУТС2013)



Основные направления работы конференции:

- новые принципы построения систем автоматизации и управления в различных отраслях науки и техники;
- современные методы представления и преобразования информации;
- физические эффекты и их использование в преобразователях физических величин;
- теория и практика построения преобразователей и датчиков;
- интеллектуальные системы контроля и управления;
- программное обеспечение информационных и управляющих систем;
- программное обеспечение АСУ ТП и SCADA-системы;
- моделирование систем автоматизации и их элементов;
- цифровая обработка сигналов и изображений;
- мехатроника и робототехника;
- методика преподавания и обучения студентов в области автоматизации и управления.

Среди участников конференции в возрасте до 28 лет будет проведен отборочный тур конкурса по Программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.) в номинации «За научные результаты, обладающие существенной новизной и среднесрочной (до 6–8 лет) перспективой их эффективной коммерциализации».

Контактные телефоны:

Тел.: (8412) 56-46-83, (8412) 36-82-10, Факс: (8412) 56-51-22.

Адрес для переписки:

440026, г. Пенза, ул. Красная 40, ПГУ, кафедра «АИТ».
avitel@pnzgu.ru

УДК 004.8+796.012

А. А. Гришин¹,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
grishin-ckb@yandex.ru,

Ю. П. Герасименко²,

д-р биол. наук, проф., зав. лаб.,
yuri51@mail.ru,

Т. Р. Мошонкина²,

канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,
tmoshonkina@gmail.com,

В. Е. Павловский³,

д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр.,

А. К. Платонов³,

д-р физ.-мат. наук, проф., зав. сектором,
platonov@keldysh.ru,

Н. С. Сербенюк³,

канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр.,
serb@keldysh.ru

¹ Институт проблем передачи информации
им. А. А. Харкевича РАН,

² Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН,

³ Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

Биомехатроника и лечебно-исследовательские тренажеры: концептуальные и медико-биологические основы*

Обсуждаются проблемы мехатроники, связанные с разработкой и реализацией лечебно-исследовательских тренажеров для стимуляции опорно-двигательного аппарата человека с нарушениями двигательной активности. Рассматриваются концептуальные и медико-биологические основы создания новых исследовательских и лечебных технологий для биологии и медицины. Исследования проводятся в рамках проектов РАН и совместного проекта РАН-БАН, цель которых — создание новых исследовательских и лечебных технологий для биологии и медицины.

Ключевые слова: биомехатроника, лечебно-исследовательский тренажер, биомеханика и физиология движений

Введение

В настоящее время в результате развития вычислительной техники и мехатроники заметно су-

* Исследования проводятся в рамках совместного проекта РАН-БАН и грантов РФФИ № 11-01-12060-офи-м-2011, 11-04-12067-офи-м-2011, 11-04-12073-офи-м-2011 и 11-04-12074-офи-м-2011.

щественное увеличение числа биомехатронных образцов тренажеров для лечебных, реабилитационных и медицинских исследовательских целей. Подобные исследования ведутся во всех технически развитых странах, и среди них выделяются разработки, выполняемые в Швейцарии, Германии, США.

Опишем задачи, которые определяют актуальность биомехатронных исследований в области лечения проблем позвоночника.

Медицинские потребности в таком оборудовании велики. Они связаны, в частности, с ростом среднего возраста населения в России, в странах Евросоюза и в США и — с сопутствующим ростом случаев инсульта, а также с тем фактом, что из-за сидячего образа жизни и обилия стрессов такие болезни "молодеют" (например, только в США по официальным данным ежегодно фиксируются до 700 000 таких заболеваний). Другим источником потребностей в таких тренажерах являются случаи спортивных, автомобильных или военных травм спинного мозга потерпевших. Так, в России по сообщениям информационных новостей только в 2010 г. произошло 199 431 дорожно-транспортное происшествие с 26 567 погибшими людьми и 250 635 ранеными, 25 % которых, по данным работы [1], имеют травмы позвоночника. По данным ВТЭК из общего числа болезней, обусловленных дорожно-транспортным, бытовым, производственным или спортивным травматизмом, больные с осложненными повреждениями позвоночника, имеющие I группу инвалидности, составляют около 8 %, т. е. не менее 20 тыс. в год. Эти данные показывают, насколько важны и востребованы медициной и населением средства борьбы с таким тяжким недугом, каким является паралич (*параплегия*¹) рук и/или ног человека.

Возможность восстановления двигательных функций у таких больных была установлена только в последние несколько лет: в спинном мозге человека было показано существование популяции нейронов, способных продуцировать шагательные паттерны, управляющие движениями ног. Такая сеть интернейронов названа генератором шагательного движения (ГШД). ГШД можно активировать с помощью электрической стимуляции спинного мозга [2, 3]. Один из способов воздействия на

¹ Paraplegia: (греч. para — около и plēgē — удар, поражение) — паралич обеих верхних (верхняя параплегия) или обеих нижних (нижняя параплегия) конечностей человека.

спинальные центры — активация естественных регуляторов шагательных генераторов. Под "естественными регуляторами шагательных генераторов" здесь понимаются поток афферентной (чувствительной) информации от различных рецепторов нижних конечностей (из многочисленных исследований известно, что они участвуют в управлении движениями). Описано, что вибрация, прикладываемая к мышцам нижних конечностей у здорового человека, в условиях внешней вывески ног в горизонтальной плоскости [4] и электрическая стимуляция периферических нервов [5] вызывают произвольные шагательные движения. Эти методы базируются на возможности активации локомоторных генераторов через "афферентный" (сигнальный для мозга) вход, воздействуя в первом случае на мышечные и кожные рецепторы, а во втором — непосредственно стимулируя афферентные нервы спинного мозга.

Известно, что механическая стимуляция опорных зон стоп в режимах естественной локомоции контролирует соотношение активности постуральных и фазных мышц в локомоторных движениях [6]. В лабораторных исследованиях показано, что периодическая стимуляция афферентов (рецепторов) задних конечностей приводит к запуску шагательного генератора и обеспечивает сохранность мотонейронов ниже уровня травмы [7, 8].

В связи с вышесказанным обоснованным является использование локомоторных тренировок в процессе реабилитации спинальных больных. Локомоторные тренировки состоят из перемещения параплегических ног в шагательном ритме по бегущей дорожке или в воздухе. Для обеспечения принудительных движений ног используется новое поколение биотренажеров с активными приводными механизмами, с необходимым очувствлением, со средствами стимуляции пациента и с развитым программным обеспечением. Большое число моделей таких биомеханических спортивных и медицинских тренажеров с развитыми элементами мехатроники уже выпускается за рубежом. В России, несмотря на упомянутую потребность в лечебных тренажерах, имеются лишь отдельные попытки их создания [9, 10]. При этом в силу особенностей авторского права многие обстоятельства конструкции зарубежных тренажеров и их программное обеспечение остаются недоопределенными.

Ниже выполнена оценка требуемых конструктивных и функциональных свойств тренажерных механизмов, предназначенных для лечения или исследования двигательных нарушений человека на разных стадиях развития и лечения травматической болезни.

Необходимые медицинские факты

Важно отметить, что паралич конечностей (особенно ног) человека представляет собой не статическое состояние, а динамический процесс, включающий в себя два процесса гибели нервных клеток пациента — *некроз* и *апоптоз*. *Некроз* представляет собой непосредственное травматическое повреждение мозговой ткани спинного мозга с последующим ее преобразованием в посттравматические мозговые рубцы и кисты. Вместе с тем, современное понимание обстоятельств протекания параплегии указывает на постепенное расширение областей действия травматического повреждения с захватыванием этим процессом как структур головного мозга, так и скелетных мышечных тканей. Этот процесс отложенной гибели — *апоптоза*² — клеток происходит путем изменения биохимических процессов послетравматического метаболизма клеток. При этом наблюдаются важные для последующего анализа три временных пика гибели клеток. Сначала наблюдается апоптоз поврежденных нейронов спинного мозга (через 4...8 часов), затем отсроченный до трех суток апоптоз вспомогательных (так называемых *глиальных*) клеток, отвечающих за проводимость нервных сигналов у дендритов нейронов центральной нервной системы (ЦНС), и, наконец, отсроченный до 7...14 суток апоптоз глиальных клеток дендритов нейронов, удаленных от места травмы [1].

Главной причиной действия апоптоза в данном случае является длительное отсутствие движения и мышечного сопротивления действию сил тяжести (*гипокинезия*) [6, 11]. В последние годы стал понятен механизм отрицательного действия гипокинезии через рефлекторные механизмы возбуждения — торможения разделов ЦНС. Поступающие в мозг сигналы рубцов и кисты в некротических очагах нервных клеток вкупе с отсутствием сигналов о требуемом силовом напряжении мышц приводят к длительному торможению центров, управляющих биохимическими процессами метаболизма нервных и мышечных тканей конечностей. Результат длительного бездействия этих центров получил за рубежом название *learned non-use* ("научился не использовать"). В результате апоптоза наряду с гибелью не получающих питание ненужных нервных клеток происходит и атрофия материала скелетных мышц. Интересно, что этот рефлекторный механизм апоптоза был отмечен не только у параплегиков, но и у космонавтов после их длительной работы в невесомости [6].

² Апоптоз (греч. *απόπτωσης* — опадание листьев) — программируемая гибель ненужных или вредных для организма клеток. Ежедневно примерно около 5 % клеток организма подвергается апоптозу.

В связи с этим важным средством лечения всех типов параплегии является пассивное (без участия пациента) или активное (иначе, "произвольное" — при участии пациента, когда это возможно) движение парализованных конечностей. Навязанное организму движение, формируя мощные афферентные (в направлении к мозгу) и эфферентные (в направлении от мозга к мышцам) стимулы, эффективно способствует восстановлению (*ресинтезу*) утрачиваемых в результате травмы необходимых биохимических процессов метаболизма в тканях скелетных мышц и их нервных путей [11].

Наивысшим современным достижением в области реабилитации спинальных больных является значимый медицинский результат 2011 г.: в работе [12] показано, что пациенты с клинически полным перерывом спинного мозга при электрической стимуляции определенных зон спинного мозга способны самостоятельно стоять и совершать шагательные движения по движущейся ленте тренажера. Более того, при некоторых условиях стимуляции у пациентов появляется возможность выполнять произвольные движения в различных суставах ног [12, 13].

Медицинские и другие требования к конструкции и мехатронике тренажера

Ввиду отмеченных выше обстоятельств становятся очевидными главные требования к мехатронике тренажера, предназначенного для реабилитации пациентов с параличами и глубокими парезами:

1. Для предотвращения апоптоза (отложенной атрофии) нервов спинного мозга и мышц ног использование тренажера должно начинаться уже в первые сутки после получения травмы и длиться, практически, непрерывно. Это означает необходимость конструктивной реализации тренажера кроватного типа.

2. Результаты экспериментов в ГНЦ РФ ИМБП РАН и в ИФ РАН определяют главное функциональное требование к реализации мехатронного биотренажера для человека: обязательную реализацию в тренажере опорных нагрузок на стопы ног человека в процессе повторяющихся шаговых циклов их движения. Это означает необходимость оснащения тренажера кроватного типа имитатором опорных нагрузок стоп пациента, соответствующих привычным для него режимам "топтанья на месте" и приседания.

3. Очевидна также и необходимость расширения провоцирования лечебного действия и других типов афферентных сигналов, поступающих в мозг в процессе шагания в норме. Можно предположить важность афферентных сигналов костно-мышечного аппарата при его нагрузке ударного типа на

каждом шаге, наряду с нервной чувствительностью инерциальных нагрузок на кровеносно-лимфатическую систему в процессе шага. Это означает, что на определенной стадии лечения следует более полно имитировать процесс шагания, используя конструкцию тренажера и позу пациента, позволяющие сделать это.

4. Медицинское использование тренажера предполагает возможность простого перемещения пациента внутрь тренажера с носилок или инвалидного кресла.

5. Важная задача, стоящая перед разработчиками тренажера, связана с его использованием в ИФ РАН в качестве средства доклинических исследований и поиска способов неинвазивного воздействия на спинальные центры в целях активации шагательных генераторов. Как было упомянуто выше, генераторы шагания могут быть активированы магнитной и эпидуральной электрической стимуляцией спинного мозга в области поясничного утолщения, либо вибрационным стимулированием мышц конечностей. Необходимо провести оценку эффективности подобных стимулирующих воздействий, регистрируя электрическую активность мышц нижних конечностей. В связи с этим тренажер должен обеспечивать в заданном режиме чрезкожную электрическую стимуляцию спинного мозга. Сигналы начала/конца, интенсивности, частоты каждого воздействия должны быть доступны для дальнейшего анализа. Кроме того, для выполнения исследований тренажер должен обеспечивать возможность реализации шагательных движений ног, должен иметь средства для стимуляции и регистрации реакций испытуемого и дополнительно иметь возможности для необходимых изменений положений испытуемого на спине, вертикально и на боку с вывеской его ног (для их освобождения от действия сил тяжести).

6. Важным моментом тренажерного оснащения является его программное обеспечение. Заметим, что требования к нему с точки зрения врача и исследователя не идентичны (или даже противоречивы). Для врача требуется максимально простое интегральное представление информации и средств управления при воздействии на пациента. При этом предполагается максимальное отчуждение процесса приема, фильтрации и содержательной обработки данных в закрытой для произвольных изменений программной системе. Для исследователя требуется иметь возможность доступа к исходной информации для ее анализа и, в случае необходимости, для изменения алгоритма, т. е. система должна быть открытой для изменений, но с контролем их непротиворечивости и процедурами возврата предыдущих версий. Удовлетворение этих противоречивых

требований достижимо стандартными средствами ограничения и предоставления прав доступа к программным модулям и элементам памяти системы.

Состояние проблемы. Особенности тренажерных конструкций для реабилитации спинальных больных

Как было сказано, важной характеристикой биотренажера, предназначенного для борьбы с атрофией мышц ног и для последующей реабилитации паралича, является возможность управления силовыми опорными воздействиями на стопы ног пациента в процессе имитации ходьбы. В медицинской практике сравнительно часто ассистентам приходится вручную прижимать стопы пациента к опорной поверхности или использовать полуручные операции. Это связано с тем, что в наиболее популярных в медицинском использовании тренажерах с бегущей дорожкой, даже снабженных устройством изменения в процессе шага силы подвеса пациента, тем не менее, больному невозможно самостоятельно осуществить движения переноса и опоры ног из-за опасности подворачивания парализованных стоп и других подобных коллизий.

Наиболее известным тренажером типа бегущей дорожки (тредбана), широко используемым для лечения нижних конечностей параплегиков, является тренажер Lokomat, производимый швейцарской фирмой Носома (Швейцария). Понимая проблему автоматизации процесса переноса и постановки ног в опору с имитацией веса, фирма Носома предложила в 2011 г. мехатронное решение (рис. 1, см. третью сторону обложки), в котором выпускаемый ею тренажер Lokomat@Nanos оснащен экзоскелетным устройством управления движениями бедра, голени и голеностопа в ритме шагания подвешенного пациента по ленте тредбана [14]. На рис. 1 показаны аппаратные механизмы формирования физиологически правильного паттерна движения ног и голеностопа в процессе шагания по ленте тредбана (Lokomat — <http://www.hocoma.com/en/about-us/media-center/media-images/>).

В этом случае тактильная стимуляция стоп ног в процессе их движения с учетом требуемых вариаций параметров их нагружения силами давления на стопу и длины их шага регулируется совместной работой экзоскелетона и устройства управляемого изменения высоты подвеса пациента.

Вместе с тем, следует заметить, что традиционная конструктивная схема бегущей дорожки для реализации шагательных движений ног оказывается не всегда пригодной для формирования требуемого мехатронного биотренажера. Одной из причин этого является ее сложность и высокая стоимость. Другим недостатком конструкции этого типа является возможность ее использования лишь на доста-

точно поздних стадиях лечения и реабилитации, когда больной уже достаточно оправился после травмы.

Укажем еще две принципиальные, на наш взгляд, разработки. На рис. 2 (см. третью сторону обложки) показан разработанный в Германии аппарат ARTROMOT и его подсистемы.

Аппарат является модульным и выпускается в вариантах для лечения тренажером различных болезней опорно-двигательного аппарата больных людей. Конструкция аппарата оказалась столь точной и удачной, что он пользуется большим спросом в мире.

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показана разработка фирмы Ekso Bionics, США (ранее фирма называлась Berkeley Bionics), которая называется eLegs (можно перевести как "электронные ноги"). Аппарат помогает параплегикам ходить.

Подчеркнем следующий факт — сейчас хорошо известна важность стимуляции опорно-двигательного аппарата ног именно в первые дни болезни. Это необходимо, как было отмечено, для предотвращения возможного апоптоза нервных клеток и атрофии мышц ног лежачего больного. Поэтому в последнее время наряду с тренажерами-тредбанами и аппаратами типа показанных на рис. 2 и 3 стала развиваться более перспективная конструктивная схема тренажеров-кроватей.

Тренажеры "кроватного" типа

Тренажеры кроватного типа удобны тем, что они приспособлены для лежачего положения больного, и, вместе с тем, они могут быть механически подняты в наклонное или вертикальное положение для получения нужного положения пациента относительно сил тяжести. Это обстоятельство заметно облегчает выполнение разных стадий лечения, операций надежного прикрепления больного к тренажеру и облегчения эмоциональных состояний больного при постепенном переходе к его вертикальному положению. Именно с этими обстоятельствами связана описываемая ниже разработка тренажера-кровати.

Наиболее известными биомеханическими тренажерами кроватного типа являются разработанный в недавние годы в Болгарии тренажер для лечения травм колена ноги человека [15], раздвижная поднимаемая кровать DRX-9000 фирмы Axiom Worldwide [16], используемая для спинальной декомпрессии, и биомеханическое устройство "Вертикаль" для создания принудительных шагательных движений, созданное в ИППИ РАН совместно с ЦКБ РАН и ИМех МГУ [9].

На рынке медицинского оборудования имеются тренажерные кровати с приводными механизмами принудительного шагания и подъема. Так, упомя-

нутая выше фирма Носота сделала попытку автоматизации выполнения опорной функции парализованной ноги в подъемно-кроватьном варианте [17] (рис. 4). В этом варианте конструкции синергия шагания на месте поддерживается афферентным сигналом нажатия на стопу большого в процессе выпрямления его коленного сустава "опорной" ноги. Но, вместе с этим, другая "переносная" нога также испытывает постепенно уменьшающееся давление на стопу, в то время как ее следовало бы мгновенно освободить и, более того, нагрузить противоположно направленной силой ее примерного веса.

Иными словами, тренажер-кровать типа Erigo, скорее всего, полезен в областях пассивно-двигательных процедур лечения костно-суставных заболеваний и профилактики ортостатической гипотензии — нарушения регуляции кровяного давления при переходе в вертикальное положение. Для рассматриваемой проблемы восстановления мышечных усилий и нервно-мозговых процессов у травматических и инсультных больных прежде всего необходима активная тренировка мышечных усилий с сопутствующей тактильной стимуляцией стоп в рамках физиологически правильного паттерна (образа) движения ног в процессе шагания. Поэтому используемые в таких тренажерах средства воздействия на стопу больного представляются достаточно примитивными, и они должны быть усовершенствованы. Требуемое усовершенствование должно заключаться в организации активного управления движением стопы и усилием, прикладываемым к стопе пациента в процессе тренажерных движений. Эта функция реализуется в российском тренажере-кровати "Вертикаль М" в процессе его модернизации.

О выборе рациональной кинематической схемы кроватьного тренажера

Необходимо заметить, что на тренажере кроватьного типа даже в условиях его вертикализации невозможно имитировать шаговые движения. Но в принципе такой тренажер позволяет получить точное формирование силовых афферентных реакций стоп человека в движениях его приседания-вставания. Смещение сил опорных реакций вдоль стопы в процессе приседания-вставания может оказаться хорошим афферентным стимулом для формирования структур нервной сети не только управления мышечным аппаратом, но, возможно, и механизмов поддержания позы.

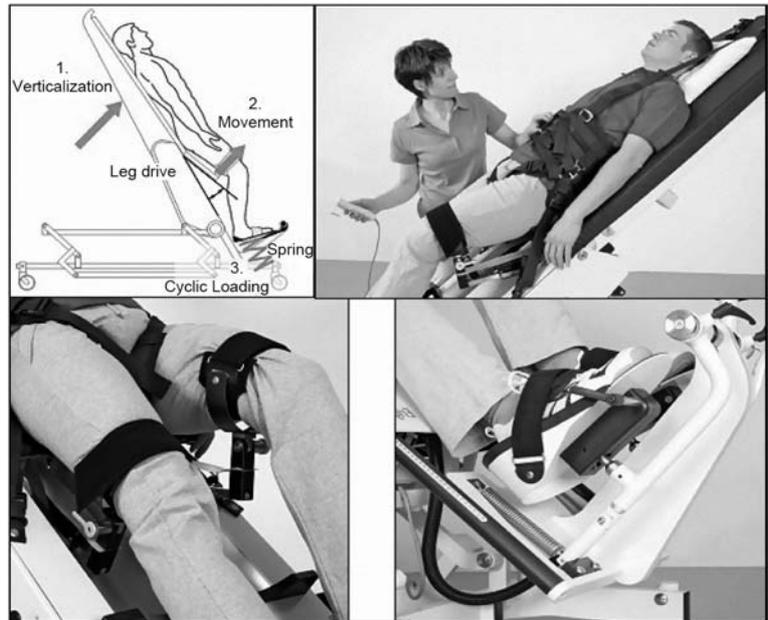


Рис. 4. Тренажер-кровать Hocoma Erigo с эффектором колена и механизмом нажатия стопы (<http://templatica.net/fixed/sell/plugins/hocoma-erigo>)

Однако такое движение нельзя выполнить без синергии поддержания равновесия путем нагибания корпуса. Это обстоятельство диктует необходимость изменения кинематической схемы поднимаемого кроватьного ложа так, как показано на схеме на рис. 5.

На этом рисунке число стрелок показывает число активных степеней подвижности кинематической схемы, задействованных при разных режимах работы. Легко видеть, что в отличие от известных кинематических схем кровати-тренажера с механизмом ее вертикализации (пять степеней подвижности и три двигателя у Hocoma Erigo и пять степеней подвижности и два двигателя у "Вертикали") в такой кинематической схеме предусмотрено шесть сте-

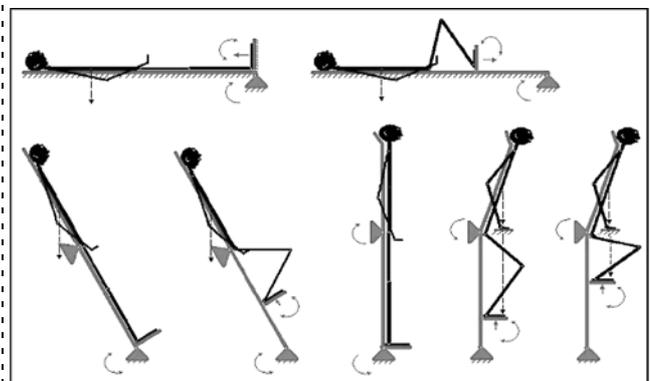


Рис. 5. Желательные степени подвижности модифицированной кровати-тренажера

пней подвижности и пять двигателей. В тренажере-кровати с такой развитой кинематической схемой требуется обеспечить синхронное управление пятью двигателями для формирования правильных ощущений человека в режимах приседания и вставания.

Тренажер-полукровать с подвесом ног

Совсем иная схема тренажера-кровати требуется для выполнения физиологических экспериментов со здоровыми испытуемыми.

Для целей исследования устройства физиологических механизмов шагательных движений у человека В. С. Гурфинкелем с соавторами был разработан оригинальный способ разгрузки ног испытуе-

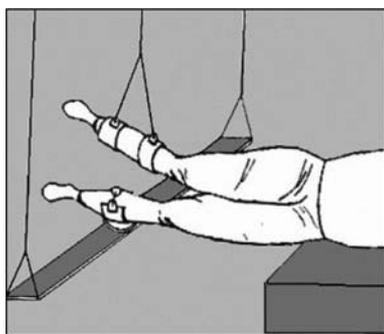


Рис. 6. Кинематическая схема экспериментального тренажера

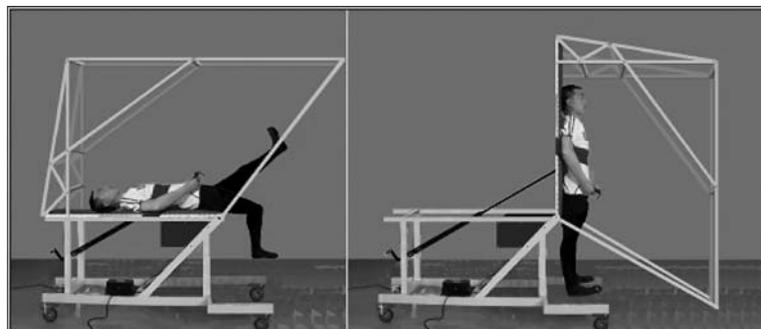


Рис. 7. Конфигурации "Лежа" и "Стоя" тренажера-полукровати

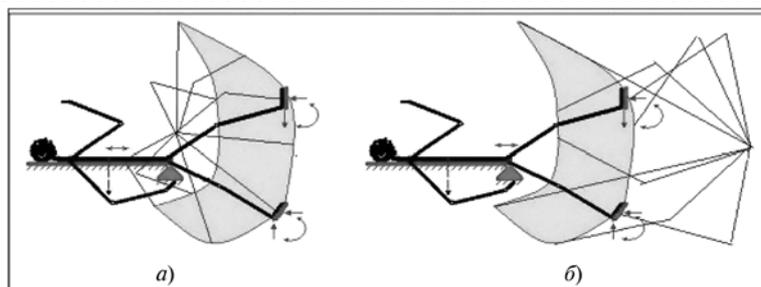


Рис. 8. Области движений стопы и 6-степенного манипулятора у каждой из двух ног:
а — проксимальное; б — дистальное расположение манипулятора

мого от сил гравитации путем его горизонтального подвеса в позиции лежа на боку [5] (рис. 6). Этот способ, исключая действие сил тяжести, позволяет фиксировать рефлекторные движения ног испытуемого в ответ на те или иные стимулы.

В настоящее время такой тренажер широко используется для исследования способов принудительной активации шагательных движений в Великолукской академии физической культуры и спорта [18]. Здесь создан, по-видимому, лучший и наиболее востребованный отечественный исследовательский тренажер-полукровать с максимальным набором мультисенсорных и мультиэффекторных средств.

Хотя такая пассивно-подвесная конструкция мало пригодна для реабилитационного тренажера, где требуется активное управляемое выполнение принудительных движений парализованных ног пациента, тем не менее, опыт оснащения этого тренажера максимально используется в разработке нового типа тренажера-полукровати, кинематическая схема и конструктивное устройство которого позволяют совместить функции лечебного и исследовательского тренажеров.

Реабилитационно-исследовательский тренажер-полукровать. Концепция

Для наиболее полной двигательной стимуляции парализованного пациента в условиях привычного действия сил гравитации рассмотрим перспективный тип тренажера-полукровати с конструктивным устройством и кинематической схемой, показанными на рис. 7 и 8. В такой конструкции вместо беговой дорожки и устройства подвеса пациента предполагается использование управляемого активного сиденья для поддержки пациента и 12-степенного манипулятора (двух 6-степенных) для формирования требуемого движения его ног. Как уже было сказано, в этом варианте конструкции тренажера допустимо его использование и для бокового расположения испытуемого с пассивным подвесом его ног.

Наибольшие конструктивные проблемы здесь возникают в связи с размещением манипулятора ног. Из рис. 8 видно, что более целесообразно проксимальное расположение манипулятора в районе седла или ног пациента. При этом уменьшением размеров рабочей области движения ног (допустимой высоты подъема ног и глубины приседания) можно легко переместить центр манипулирования в область района седла пациента.

Резюмируя, можно сказать, что развитая конструктивная схема современного мехатронного биотренажера должна содержать следующие обязательные части:

1. Элементы механики и управления приводных систем двигателей тренажера.
2. Датчики силы, линейных и угловых перемещений элементов конструкции тренажера.
3. Электронное оборудование с программным обеспечением средств управления движениями тренажера.
4. Программное обеспечение интерфейсных средств пациента, врача и исследователя.
5. Средства формирования давления на стопы ног в процессе опорной фазы цикла шага.
6. Устройство подвеса парализованного пациента.
7. Управляемые элементы для принудительного формирования в цикле шага движений сгибания — разгибания суставов бедра, голени и стопы ног.
8. Датчики позы и физиологических параметров пациента.

Средства формирования давления на стопы ног в процессе опорной фазы цикла шага

Выше была отмечена важность формирования давления на стопы ног в процессе реабилитационной стимуляции организма человека средствами тренажера. До сих пор описываемые средства формирования давления заключались в использовании упора ног пациента в конструкцию тренажера под действием двигателей тренажера или просто под действием сил тяжести пациента. Вместе с тем, как это показано в работе [6], формирование требуемых сил давления может быть получено компенсатором опорных нагрузок, например, типа известных "КОР" или "КОРВИТ" в виде специальных надувных стелек, работающих от программатора в режиме выполнения поочередного давления на пяточную и плюсовую зоны стоп ног синхронно с опорными фазами шагового цикла ног.

Подобный имитатор опорных реакций предполагается использовать в предлагаемом тренажере [21, 22]. При этом в программное обеспечение добавляется блок управления клапанами пневмосистемы, отрабатывающий имитируемые усилия. Важно отметить, что требуемый динамический диапазон силового управления нагрузками ног превышает нагрузку стоящей ноги. Он определяется хорошо известными в биомеханике безразмерными характеристиками, отнесенными к весу G человека (около 120 % с разрешением 0,1 %), требуемого согласования вертикальных сил R нагрузки на стопы попеременно опорных ног в пределах шага одной ноги T [19]. Выполнение этих требований позволяет организовать компьютерную адаптацию к весу

пациента и к лечебному уровню темпа ходьбы. Они позволяют также адаптировать тренажер к возможностям скелетно-мышечной системы пациента путем уменьшения и периодического регулирования максимальной нагрузки ног.

Управляемое средство для формирования сгибания — разгибания голеностопа

В качестве другого — автономного средства формирования афферентации лежащего больного разработан тренажер голеностопа с миографическим очувствлением стоп и мышц голени, активным управлением сгибания — разгибания голеностопа и с аналогичным показанному выше пневматическим иммитатором опорных реакций. Такой тренажер является средством исследований методов борьбы с атрофией мышц на ранней стадии лечения — в первые дни после травмы. Принудительные сгибания — разгибания голеностопного сустава ноги, воздействуя на парализованные мышцы через их сухожилия, должны способствовать сохранению и увеличению их кровоснабжения. Сопровождающие эти движения прессовые воздействия на стопу (на пяточную область при ее движении "от себя" и на область пальцев при вытягивании стопы) с помощью пневматических подушек (рис. 9), расположенных под вкладышем тренажера с ногой в нем, формируя тактильные афферентные сигналы, должны препятствовать процессам апоптоза, вызывающим атрофию мышц. 14 электродов миографа, расположенных на внутренней стороне стопы и голени вкладыша тренажера, предназначены для контроля состояния мышц не полностью парализованной ноги. Число сенсоров и их типов в тренажере может быть увеличено в зависимости от числа входов используемого аналого-цифрового преобразователя [21].



Рис. 9. Пневматические прессовые эффекторы стопы и пневмоклапаны управления ими

Сенсорные средства для регистрации физиологических параметров пациента и стимуляционные средства биомехатронного тренажера

В приведенных выше примерах проблемы создания мехатронных модулей были ограничены стандартными решениями простых задач управления движением электрических и гидравлических приводных механизмов медицинской техники. В таких чисто эффекторных тренажерных системах отсутствуют и в связи с этим требуют развития научные составляющие, связанные с проблемами автоматизации мультимодального и мультисенсорного взаимодействия мехатронного устройства с телом пациента. Реализация этих составляющих рассматривается как ближайшее развитие исследования, описанного в данной статье.

Конкретизируя, отметим, что один из первых шагов в этом направлении у нас в стране сделал в 20-х годах 20-го века известный биомеханик Н. М. Бернштейн, развивший изучение движений человека методами циклофотограмм.

Эти направления в настоящее время получили существенное развитие за рубежом, где активно создаются средства оцувствленного биоуправления — по сигналам, получаемым от организма пациента. Одним из направлений таких работ, важных для развития биомехатроники, является создание техники детектирования сигналов электрического сопротивления кожи или электроэнцефалограммы EEG мозга с передачей их в компьютер для анализа по радиоканалу Bluetooth на расстоянии до 10 м и по RF-каналу — до 600 м [20].

В России биомехатроника в указанном смысле получила наибольшее развитие в Великолукской академии физкультуры и спорта, где для проведения исследований развит мощный комплекс мультимодального и мультисенсорного взаимодействия мехатронного устройства с телом испытуемого.

На основе анализа указанных работ сформулируем требования к сенсорной системе тренажера.

К необходимым в первую очередь сенсорным элементам тренажера отнесем следующие:

- 1) зрительная система измерения позы и движений человека;
- 2) зрительная система измерения объема мышц;
- 3) тепловизионная система контроля кровотока;
- 4) акселерометр (направление силы тяжести в координатах тренажера);
- 5) датчики углов в степенях подвижности (элемент системы управления);
- 6) датчики силы давления стоп ног (элемент системы управления);
- 7) виртуальные датчики момента привода (элемент системы управления);
- 8) датчики веса нижних конечностей и тела человека.

Необходимые в первую очередь сенсорные элементы, устанавливаемые на человеке, должны измерять:

- 1) электрические поля и потенциалы на коже (миограммы);
- 2) электрические поля и потенциалы на коже (анализ реакции организма);
- 3) электрические поля и потенциалы на коже (анализ подкожных токов);
- 4) электрические поля и потенциалы на коже (потоотделение на ладонях — состояние психики);
- 5) частоту дыхания и температуру;
- 6) ЭКГ и кровяное давление;
- 7) ЭЭГ (исследования сигналов мозга);
- 8) температуру с глубин до 5 см (радиотермограф — антенны на дециметровых длинах волн).

Анализ перечисленных сенсорных данных позволит построить адекватное управление тренажером, а их развитие, естественно по этапам, ведет к созданию в системе тренажера интерфейса мозг — компьютер (ИМК). Схема этого интерфейса приведена на рис. 10 (см. третью сторону обложки). Приближенная схема человеческого мозга и его отделов на схеме взяты из работы [23]. Потоки SW в левой части схемы означают софтверные преобразования информации и потоки управления.

В этой схеме возможна реализация режима, когда по нервным импульсам от нервной системы человека тренажерная система будет воспроизводить требуемые движения.

Заключение

В качестве окончательного резюме сформулируем следующие выводы.

1. Медико-биологические предпосылки развития лечебно-исследовательских тренажеров заключаются в необходимости наблюдения картины невроза в организме пациента для диагностики динамики процесса лечения.

2. Современные средства механики, электроники, сенсорики и их программное обеспечение позволяют это реализовать и получить новый импульс развития биологических исследований.

3. Дальнейшие работы в тесном содружестве биологов, медиков и мехатроников следует направить на создание отечественных многофункциональных тренажеров с развитыми компьютерными средствами афферентации и стимуляции пациента с использованием обратной связи от средств оцувствления его организма.

Приведенные в статье примеры определяют такие пути реализации биомехатронных тренажеров.

Список литературы

1. Петров К. Б., Иванчин Д. М. Патологические основы комплексной реабилитации при травматической болезни спинного мозга (по данным мировой литературы) // Вертебро-неврология. 2005. № 3—4. С. 70—81.

2. **Dimitrijevic M., Gerasimenko Yu., Pinter M.** Evidence for a spinal central pattern generator in humans // *Ann. NY Acad. Sci.* 1998. V. 860. P. 360.

3. **Gerasimenko Yu. P., Avelev V. D., Nikitin O. A., Lavrov I. A.** Initiation of locomotor activity in spinal cats in conditions of epidural stimulation of the spinal cord // *Ros. Fiziol. Zh. im. I. M. Sechenova*, 2001. 87, No. 9. P. 1164—1170.

4. **Гурфинкель В. С., Левик Ю. С., Казенников О. В., Семенов В. А.** Существует ли генератор шагательных движений у человека? // *Физиология человека.* 1998. Т. 24. № 3. С. 42.

5. **Selionov V. A., Ivanenko Y. P., Solopova I. A., Gurfinkel V. S.** Tonic central and sensory stimuli facilitate involuntary airstepping in humans // *J. Neurophysiol.* 2009. V. 101. P. 2847.

6. **Григорьев А. И., Козловская И. Б., Шенкман Б. С.** Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы // *Рос. физиол. журнал им. И. М. Сеченова*, 2004. Т. 90, № 5. С. 508—521.

7. **Мошонкина Т. Р., Гилерович Е. Г., Федорова Е. А., Аве-лев В. Д., Герасименко Ю. П., Отеллин В. А.** Морфофункциональные основы восстановления локомоторных движений у крыс с полной перерезкой спинного мозга // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2004. Т. 138, № 8. С. 225—229.

8. **Гилерович Е. Г., Мошонкина Т. Р., Федорова Е. А., Шишко Т. Т., Павлова Н. В., Герасименко Ю. П., Отеллин В. А.** Морфофункциональная характеристика поясничного утолщения спинного мозга крысы // *Морфология.* 2007. № 5. С. 33—37.

9. **Применение** функциональной электромиостимуляции в восстановительном лечении. ИППИ РАН, ЦКБ РАН. URL: <http://www.iitp.ru/ru/science/works/414.htm>

10. **Авторский** центр здоровья доктора Блюма. Пять классов авторских тренажеров и приспособлений. URL: <http://www.doc-torblum.ru/technics/equipment/>

11. **Яковлев Н. Н.** Химия движения: Молекулярные основы мышечной деятельности. Л.: Наука, 1983. 191 с.

12. **Harkema S., Gerasimenko Y., Hodes J., Burdick J., Angeli C., Chen Y., Ferreira C., Willhite A., Rejc E., Grossman R. G., Edger-ton V. R.** // Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal

cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. *Lancet* 377. 2011. P. 1938—1947.

13. **Американские** врачи сумели поставить парализованного человека на ноги // *Служба МедНовостей: MedPortal.ru*

14. **Носома** launches a new version of its established gait training device LokomatPro. URL: http://www.hocoma.com/en/news-events/news/newsdetail/hocoma-lanciert-cinc-neuc-version-des-erfolgreichengangroboters-lokmatpro/049ale28c8ab4hbd927863a17f6ab472/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=1

15. **Mitutsova L.** Biomechanical control of the rehabilitation of a knee joint after trauma // *Proceed. of conf. "Biomechanics of Man 96"*, Prague, 1996. P. 131—134.

16. **Машина** для спинальной декомпрессии: <http://www.cure-back-pain.org/DRX-9000.html>

17. **Тренажер** Hokomo Erigo. URL: <http://templatica.net/fixed/sell/plugins/hocoma-erigo>

18. **Городничев Р. М., Мачуева Е. Н., Пивоварова Е. А., Семенов Д. В., Иванов С. М., Савохин А. А., Эджергон Р., Герасименко Ю. П.** Новый способ активации генераторов шагательных движений у человека // *Физиология человека.* 2010. Т. 36, № 6. С. 95—103.

19. **Платонов А. К., Герасименко Ю. П., Илиева-Митуцева Л., Никитин О. А., Сербенюк Н. С., Трифионов О. В., Ярошевский В. С.** Биомехатронные элементы стимулятора стопы человека // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша.* 2011. № 38. 32 с.

20. **Электронные** ресурсы. URL: <http://www.physorg.com/news/130152277.html>; <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3502194.stm>

21. **Павловский В. Е., Платонов А. К., Сербенюк Н. С., Ярошевский В. С., Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. В., Митуцева Л.** Биомехатронные элементы стимулятора голеностопа человека // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша.* 2012. № 15. 20 с.

22. **Платонов А. К., Павловский В. Е., Сербенюк Н. С., Гришин А. А., Герасименко Ю. П., Мошонкина Т. Р.** Биомехатроника лечебно-исследовательского тренажера-кровати // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша.* 2012. № 16. 32 с.

23. **Бернштейн Н. А.** О построении движений. М.: Медгиз, 1947. 255 с.

УДК 004.8+796.012

В. Ф. Головин, канд. техн. наук, доц.,
М. В. Архипов, ассистент,
В. В. Журавлев, ассистент,
medicalrobot@mail.ru,
 Московский государственный
 индустриальный университет

Биомехатроника в медицинской робототехнике

Рассматривается новое концептуальное направление — биомехатроника, причем в качестве объектов предлагается рассматривать медицинские роботы, содержащие биомехатронные компоненты. Приводятся примеры таких медицинских роботов (Lokomat, Da Vinci, Cyberknife, MSIU, Paul), особенностью которых является наличие активных взаимодействующих компонентов: врача, робота, пациента. Обозначена проблема подготовки специалистов, которые будут развивать и обслуживать объекты биомехатроники.
Ключевые слова: биомехатроника, биотехническая система, робототехника, механотерапия, восстановительная медицина, холический капиллярный массаж, линейный шаговый электропривод

Введение

Термин "биомехатроника" в связи с медицинской робототехникой впервые появился в 2004 г. в статье [1], а в 2005 г. был использован в материале, опубликованном в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" [2]. Понятие "биомехатроника" тогда показалось тенденциозным, преждевременным, но подразумевалось введение нового компонента в триаду механика, электроника, вычислительная техника. В контексте рассмотрения мобильных роботов в 2005 г. понятие "биомехатроника" появляется в монографии [3]. В 2006 г. были определены некоторые направления фундаментальных и прикладных исследований в области биомехатроники [4]. В этих работах отмечается, что взаимодействие техники с человеком вызывает необходимость развития определенного интерфейса. Для управления, в том числе автоматического, в масштабе реального времени начинают использовать измеряемые биомедицинские параметры. Новые технологии позволяют интегрировать малого размера биокомпоненты с механическими, электронными,



Рис. 1. Структура биомехатроники

компьютерными составляющими. Развивается биоморфное машиностроение, использующее решения биомеханики и биокибернетики. Понижение порогов восприятия окружающего мира человеком обязано появлению биороботов, создаваемых с использованием биогибридных технологий [5]. Так же, как при появлении мехатроники в промышленности, возникает необходимость синергетической интеграции указанных компонентов с биокомпонентами.

Структура биомехатроники может рассматриваться как тетрада с пересекающимися областями компонентов (рис. 1).

Примеры роботов, содержащих биомехатронные компоненты

Робот швейцарской фирмы "Lokomat" [6] является представителем подкласса реабилитационных роботов для выполнения движений конечностей в бедренных, коленных и голеностопных суставах. Существует концепция нейропластичности, которая предполагает "постановку задачи специфического обучения" и заключается в том, что с помощью многократно повторяющихся тренировок можно улучшить повседневную двигательную активность у пациентов с неврологическими нарушениями. Роботизированная терапия с использованием комплекса Lokomat отвечает вышеописанным требованиям и дает возможность проведения интенсивной локомоторной терапии с обратной связью. Lokomat состоит из четырех приводов для навязывания движений ходьбы, системы разгрузки веса пациента и беговой дорожки. Усиленная мотивация пациента осуществляется за счет управления нагрузкой с помощью биологической обратной связи при выводе текущего состояния на монитор.

Хирургический робот Da Vinci, разработанный компанией "Intuitive Surgical", состоит из трех основных блоков: операционной консоли с четырьмя исполнительными манипуляторами, приборной панели и управляющей панели оператора [7]. Манипуляторы оперируют сменными инструментами, которые фиксируются автоматически на инструментальных фланцах манипуляторов. Наиболее распространенными для этого робота являются уроло-

гические операции, например, лапароскопическая простатэктомия — удаление предстательной железы с семенными пузырьками при раке простаты. Вместо разреза длиной до 8 см, при лапароскопической простатэктомии выполняются несколько небольших разрезов. В эти разрезы в брюшную полость с помощью манипуляторов вводят видеоканнеру и лапароскопические инструменты. Робот Da Vinci дает возможность дистанционного управления, во-первых, удаляя врача-оператора из стерильной операционной комнаты, а во-вторых, в случае, когда оперируемый пациент находится в одном городе, а врач-оператор — в другом.

Робот Cyberknife [6], разработанный компанией Kuka, представляет неинвазивную хирургическую систему для удаления опухолей. Опухоль разрушается направленным пучком рентгеновского излучения. Ускоритель с напряжением 6 МВ монтируется на руке. Рентгеновское излучение концентрировано направляется на опухоль с необходимым расчетным дозированием, причем так, чтобы минимально повреждать близлежащие ткани. Пациент лежит на кушетке, которая управляется пятиступенным позиционером, следящие системы которого позволяют совмещать систему координат пациента и робота и корректировать возможное смещение пациента, в том числе при дыхании.

Типичным примером биомехатронной системы с управлением по физиологическим параметрам также может быть робототехническая система MSIU, разработанная в МГИУ [8, 9]. Существующие аппаратные средства выполняют предписанные механические воздействия на пациента (массаж, движения конечностей в суставах, постизометрическая релаксация, мобилизация), объективно не оценивая терапевтический эффект. Но во время серии сеансов или в течение одного сеанса механотерапии можно наблюдать изменения ряда физиологических параметров пациента, оценивать эффективность терапии и изменять план процедур, т. е. управлять механотерапией. Одними из наиболее информативных физиологических параметров состояния пациента являются мышечный тонус и электрокожное сопротивление. Эти параметры, несмотря на помехи со стороны психики пациента, откликаются на механотерапевтические воздействия как в сторону релаксации, так и в сторону мобилизации пациента.

Возможная схема взаимодействия между компонентами — оператором-врачом, роботом, пациентом — при выполнении роботом механотерапии представлена на рис. 2, где показаны возможные связи между компонентами: 1 — сигналы опасности, отключающие робот; 2 — сигналы субъективного состояния пациента; 3 — психологическое воздействие врача на пациента; 4 — задаваемые значения усилий, перемещений, скоростей, тонуса мышц, электрокожного сопротивления; 5 — сигналы о реальном состоянии мягких тканей пациента для по-

зиционно-силового управления; 6 — сигналы о реальном состоянии пациента для биотехнического управления; 7 — сигналы командного управления роботом; 8 — воздействия врача при мануальном исполнении процедуры; 9 — полученные в предыдущих сеансах и пополняемые данные.

Воздействие на управление со стороны психики и физиологии может быть как положительным, например, в случае биологических обратных связей, так и отрицательным, в случае, например, помех. Поэтому для управления необходимо выбирать измеримые физиологические параметры, в которых в большей степени проявляется управляющее воздействие, чем помехи.

Если в управлении принимают участие технические компоненты, то управление называют биотехническим. К системам биотехнического управления относятся не только известные в робототехнике системы командного, следящего и интерактивного управления, но и системы искусственной вентиляции легких, вспомогательного кровообращения, системы с биологической обратной связью.

Одной из простейших биомехатронных систем является робот Paul для холического пульсационного массажа с линейным шаговым электроприводом [11, 12].

В 2010 г. на рынках России и Запада появляется проволочный массажер поверхности головы. В России его называют "Мурашка" или "капиллярный массажер", на Западе — tingler head massager, octopus massager.

Но эффективен массажер не при самомассаже, а когда движения выполняет кто-то или что-то, например, робот.

Блок привода робота Paul представлен на рис. 3.

Управляется робот программно от пульта, а также от датчика пульса пациента и музыкального ритма плеера.

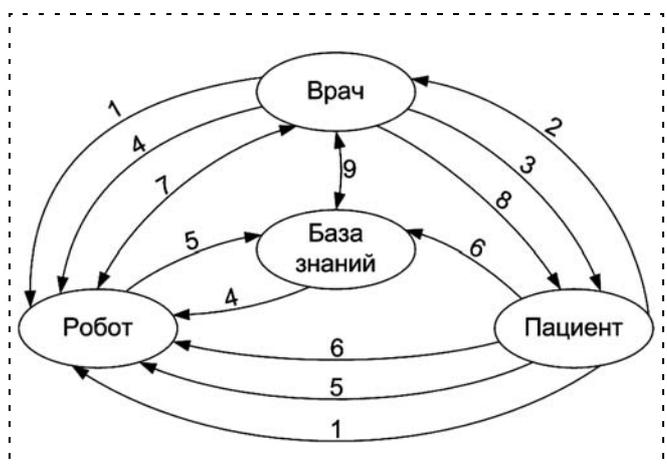


Рис. 2. Схема взаимодействия между компонентами системы оператор-врач-робот-пациент

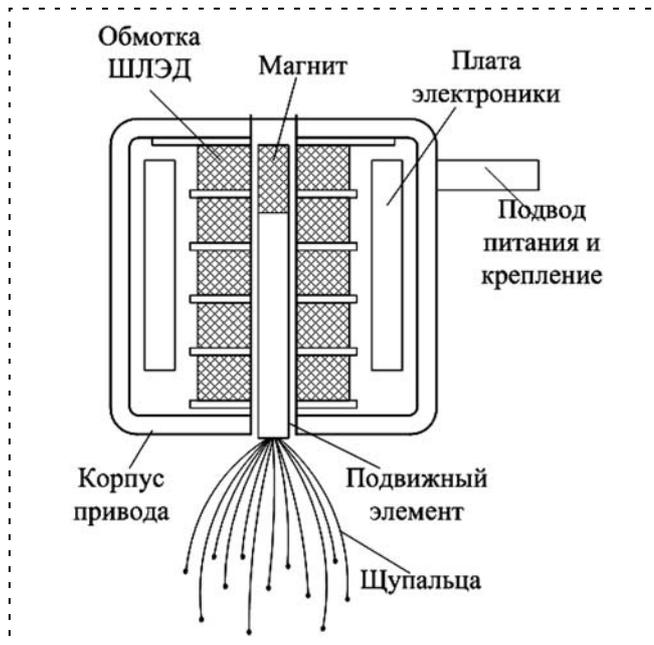


Рис. 3. Блок электропривода робота Paul

Перед отдельно выпускаемым инструментом "Мурашка" робот Paul имеет следующие преимущества:

1. Робот-носитель инструмента позволяет клиенту не двигаться, полностью расслабиться.
2. Магнитное поле подвижного элемента привода обеспечивает магнитотерапию.
3. Изменение ритма пульсаций обеспечивает наиболее эффективное воздействие (в последующих версиях обеспечивается биологическая обратная связь).
4. Измерение артериального давления и частоты сердечных сокращений позволяет пациенту объективно контролировать прогресс собственного состояния (в последующих версиях обеспечивается биологическая обратная связь).
5. Сочетанность с мело-, арома- и психотерапией повышает эффективность процедур.
6. Простое крепление адаптирует робот к любому креслу.

Заключение

Пятьдесят лет тому назад выдающийся ученый академик РАН Аксель Иванович Берг на заседании отделения биологии Академии наук СССР призвал объединить усилия ученых и специалистов биологического направления с деятельностью инженеров, физиков и математиков для взаимного обогащения идеями и знаниями. Призыв был услышан, и вскоре в научном совете по комплексной проблеме "Кибернетика" была организована специальная секция биологической кибернетики и бионики [10]. Следующим этапом должна была стать подготовка

технических специалистов-инженеров совершенно нового типа, с особыми требованиями к их профессиональной подготовке. Так, в 1962 г. в Ленинградском электротехническом институте была организована новая кафедра "Электронная медицинская аппаратура". В МВТУ им. Н. Э. Баумана создан факультет "Биомедицинские технологии". В настоящее время в России насчитывается более 70 кафедр направления "биомедицинская инженерия". На Западе распространены научно-образовательные центры биомедицинской техники, а также медицинской робототехники. Поэтому развитие биомедицины в направлении биомехатроники и развитие соответствующего образования являются актуальными задачами.

Список литературы

1. Разумов А. Н., Саморуков А. Е., Головин В. Ф. Концепция биомехатроники в медицинской технике // Тр. 1-го Международ. симпозиума по восстановительной медицине и реабилитации. 2004.
2. Разумов А. Н., Подураев Ю. В., Головин В. Ф. Мехатронный подход при проектировании медицинской техники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 7. С. 50—52.

3. Садовничий В. А., Александров В. В., Лемак С. С., Шкель А. Н. О биомехатронике // Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 53—60.
4. Мартыненко Ю. Г., Соколов М. Э., Буданов В. М., Белотелов В. Н., Ленский А. В., Пахомов В. Б. Постановка фундаментальных и прикладных исследований в области биомехатроники // Изв. ТРТУ. 2006. № 3. С. 29—35.
5. Каляев И. А., Капустян С. Г., Буриков А. А., Севостьянова М. В. Перспективы создания биороботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 3. С. 29—33.
6. Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В. Робототехника в восстановительной медицине. Роботы для механотерапии. LAP LAMBERT Academic Publishing, GmbH & Co. KG, 2012. 280 с.
7. Tavakoli M., Patel R. V., Moallet M., Aziminejad A. Haptics for teleoperated surgical robotic systems // New Frontiers in Robotics. 2008. V. 1. 180.
8. Golovin V., Grib A. Mechatronic system for manual therapy and massage // Proc. 8th Mechatronics Forum International Conference. University of Twente, Netherlands, 2002.
9. Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В. Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 54—56.
10. Головин В. Ф. О создании специальности "Медицинская робототехника" // Proc. of the 8th Russian-Bavarian conference on biomedical engineering. Saint Petersburg, 2012.
11. Массажер для головы и тела. URL: <http://www.massagerell.ru>
12. Линейные шаговые двигатели, двигатель 25BYZ. URL: <http://www.stepmotor.ru/production/detail.php?ID=938>

ИНФОРМАЦИЯ



с 15 по 19 апреля 2013 г. в Санкт-Петербурге
в Институте прикладной астрономии РАН состоится

Пятая Всероссийская конференция «ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ И НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ» (КВНО-2013)



Конференция приурочена к 25-летию создания Института прикладной астрономии РАН.

Основными задачами конференции являются обсуждение широкого круга научно-методических, технических и организационно-правовых вопросов в области фундаментального и прикладного координатно-временного и навигационного обеспечения.

Практическим выходом конференции будут рекомендации по повышению точности и надежности координатно-временного и навигационного обеспечения, эффективности совместного применения технических средств и систем КВНО

Председатель программного комитета конференции — академик РАН **Н. П. Лаверов**

Тематика конференции

- Теоретические основы фундаментального координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Методы координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Технические средства и системы координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Программные средства, центры данных и распределенные центры обработки наблюдений и анализа данных.
- Международные программы и международное сотрудничество в области координатно-временного и навигационного обеспечения.
- Метрологическое обеспечение средств и систем координатно-временного и навигационного обеспечения: состояние и перспективы развития.
- Проблемные вопросы формирования и администрирования массовых услуг, основанных на применении КВНО.

Полную информацию о конференции можно найти на сайте ИПА РАН:
<http://www.ipa.nw.ru/conference/kvno2013/reg.html>

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 12
декабрь
2012

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
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.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

**Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк,
Хахулин Г. Ф., Малыгин В. Б.**

Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов 50

Быстров Л. Г., Попов А. А., Тетерин Д. П.

Методика оценки работоспособности элементов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях произвольных входных возмущающих воздействий 56

Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.

Динамические температурные погрешности в каналах термокоррекции семейств градуировочных характеристик системы измерения с кластерами одновитковых вихретоковых датчиков 62

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, зам. зав. кафедрой,
kaf301@mai.ru,

Тин Пхон Чжо, докторант,
thethtweaung@gmail.com,

Зо Мин Тайк, аспирант,
zawminhtike147@gmail.com,

Г. Ф. Хахулин, зав. кафедрой,
kaf301@mai.ru,

Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет),

В. Б. Малыгин, начальник учебно-тренажерного
центра Московского государственного
университета гражданской авиации

Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов*

Сформулирована задача контроля безопасности движения транспортных средств в случае пересечения их маршрутов. Предложены алгоритмы выбора различных скоростей продольного движения и управления боковым движением, увеличивающие минимальную дистанцию при сближении транспортных средств.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, летательные аппараты, динамическое программирование, функция риска

Введение

При сближении двух управляемых транспортных средств (ТС), таких как самолеты, речные суда, автомобили, весьма вероятно пересечение их маршрутов, как показано на рис. 1, в земной системе координат m и n . Безопасность движения ТС определяется минимальным расстоянием d_0 между ними в окрестности точки C_0 . Для его увеличения необходимо использовать различные возможности, зависящие от типа транспорта:

- для городского транспорта при встрече на перекрестках нужно согласованно регулировать скорости продольного движения ТС: в зависимости от того, кто приближается к перекрестку раньше, тот должен иметь повышенную скорость, и наоборот, другой транспорт снижает свою скорость;
- для речных судов кроме регулирования скорости попутного движения возможно дополнительное управление боковым движением;
- для воздушных судов существуют три степени свободы управления, так как они могут разминуться, летя на разной высоте, расходясь однако на это дополнительное топливо.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-0028а).

Постановка задачи

1. Заданы уравнения движения первого ТС

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -a_1x_2 + b_1u_1; \\ \dot{z}_1 = z_2; \\ \dot{z}_2 = -a_2z_2 + b_2u_3, \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 — координата попутного движения ТС; x_2 — попутная скорость ТС; z_1 — координата бокового движения первого ТС; z_2 — боковая скорость движения первого ТС; u_1 и u_3 — сигналы управления.

Заданы уравнения движения второго ТС:

$$\begin{cases} \dot{l}_1 = l_2; \\ \dot{l}_2 = -a_1l_2 + b_1u_2; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = -a_2y_2 + b_2u_4, \end{cases} \quad (2)$$

где y_2 — известная боковая скорость движения второго ТС, положение которого характеризуется меняющейся координатой y_1 бокового движения; l_2 — попутная скорость движения второго ТС; l_1 — координата попутного движения второго ТС; u_2 и u_4 — сигналы управления.

2. Начальное состояние первого ТС (рис. 1) определяется нулевыми значениями:

$$m_1(0) = z_1(0) = 0; \quad n_1(0) = x_1(0) = 0.$$

Начальное состояние второго ТС определяется своими заданными ненулевыми значениями:

$$m_2(0) = l_1(0); \quad n_2(0) = y_1(0).$$

Величина $l_1(0) < 0$, если второй транспорт приближается слева (рис. 1).

3. Начальные скорости $V_1 = x_2$ и $V_2 = l_2$ попутного движения обоих ТС одинаковы и равны V_H , поэтому

$$x_2(0) = l_2(0) = V_H.$$

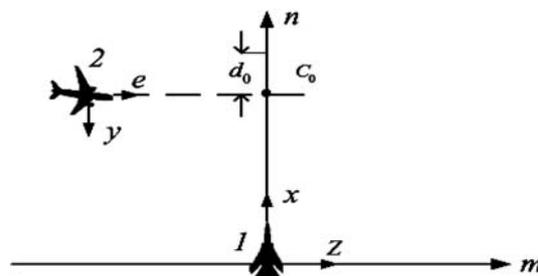


Рис. 1. Пересечение маршрутов в точке C_0 при поперечном движении транспорта

4. При поперечном пересечении маршрутов курсовые углы образуют между собой угол $\Delta\psi$, близкий к 90° , и поэтому скорость сближения ТС можно считать известной и постоянной.

5. Дистанция d_0 между ТС при встрече определяется формулой

$$d_0 = |[n_2(0) - n_1(0)] - [m_2(0) - m_1(0)]| = |y_1(0) - l_1(0)|.$$

Минимум параметра d_0 определяет безопасность движения при прямолинейном равномерном движении. Если движение первого ТС описывается в системе координат z и y , второго ТС — в системе координат x и l , то дистанция d в любой момент времени равна

$$d = \sqrt{(z-y)^2 + (x-e)^2}.$$

6. Задан интегральный критерий Y , определяющий в свертке штрафы за снижение безопасности движения, отклонения от заданных линий M_1 и M_2 пути, пересекающихся в точке C_0 , и расходуемую энергию на управление:

$$Y = \min \int_0^T \left[r_0 \sum_{i=1}^4 u_i^2 + r_1 [(z_1 - M_1)^2 + (y_1 - M_2)^2] + r_2 (z_2^2 + y_2^2) + r_3 M_3 \right] dt, \quad (3)$$

где r_0 — штраф за потраченную мощность при управлении; r_1 — штраф за отклонение от заданной линии пути m ; r_2 — штраф за отклонение по скорости; r_3 — штраф за приближение к другому ТС; M_3 — главный штрафной показатель, оценивающий возможный ущерб от аварийного сближения транспортов и зависящий от переменной дистанции d по формуле

$$M_3 = \frac{r_3(x_1 - z + D)^2}{1 + \frac{d^2}{(x_1 + D)^2}},$$

где D — заданная дистанция безопасного сближения.

Требуется:

- определить логику согласованных действий двух ТС при уклонении от опасной встречи;
- синтезировать оптимальное управление продольным и боковым движением;
- промоделировать полученные алгоритмы выбора режимов движения и повысить безопасность за счет оптимального поведения.

Цель управления состоит в том, чтобы увеличить минимальную дистанцию d при сближении ТС.

Логика выбора задающих воздействий для системы управления продольным и боковым движением ТС при их сближении

Определим логику поведения при сближении транспортов исходя из трех вариантов:

- альтернативная классификация ситуации, когда прямолинейное движение при номинальных постоянных скоростях V_H неопасно при сближении или, наоборот, необходимо предпринять дополнительные меры;
- выбор задающих скоростей, который несложно сделать, так как при прямолинейном равномерном движении легко найти времена t_1 и t_2 достижения точки C_0 и модуль их разности Δt .

$$t_1 = \frac{n_2(0)}{V_H}; t_2 = \frac{-m_2(0)}{V_H}; \Delta t = \left| \frac{n_2(0) + m_2(0)}{V_H} \right|.$$

Таким образом, минимальная дистанция \hat{d}_0 — это величина, которая должна превысить заданную безопасную дистанцию (D). Чтобы считать ситуацию сближения неопасной, нужно соблюсти условие

$$|n_2(0) + m_2(0)| > D. \quad (4)$$

Если условие (4) не соблюдается, то в качестве первой попытки необходимо изменить скорости движения ТС. Если второе ТС достигает точки C_0 позже первого в случае

$$n_2(0) + m_2(0) \leq 0,$$

то тогда первое ТС должно двигаться с максимальной доступной скоростью $V_H + \Delta V$, а второе — с минимальной скоростью $V_H - \Delta V$, и поэтому времена t_1 и t_2 достижения точки C_0 станут равны

$$t_1 = \frac{n_2(0)}{V_H + \Delta V}; t_2 = -\frac{m_2(0)}{V_H - \Delta V};$$

$$\Delta t = \frac{m_2(0)}{V_H - \Delta V} - \frac{n_2(0)}{V_H + \Delta V}.$$

Тогда первое ТС при попадании второго в точку C_0 удалится от нее на расстояние d_1 , которое должно превосходить безопасную дистанцию D :

$$-m_2(0) \frac{1 + \frac{\Delta V}{V_H}}{1 - \frac{\Delta V}{V_H}} - n_2(0) \geq D. \quad (5)$$

Например, если $m_2(0) = -n_2(0)$; $\frac{\Delta V}{V_H} = 0,2$, то условию (5) соответствует упрощенное неравенство

$$0,5n_2(0) \geq D. \quad (6)$$

Если же не соблюдается и условие (5), то используется третий вариант — боковой обходной маневр. Как показали предварительные исследования встречного, попутного и поперечного движений, в последнем случае, как и при встречном движении, оба транспорта должны поворачивать в одну из сторон — вправо или влево. А именно, если $m_2(0) < 0$, то боковое движение осуществляется вправо, если $m_2(0) > 0$, то влево. Это соображение справедливо при дальности d обнаружения друг друга,

большой или соизмеримой с радиусом $R = \frac{V_H^2}{a}$ бокового маневра при заданном ограниченном боковом ускорении a . И лишь при попутном движении с незначительной разницей $\Delta\psi$ курсов необходимый маневр двух ТС осуществляется в разные стороны. Общая блок-схема логического анализа условий сближения транспортов показана на рис. 2.

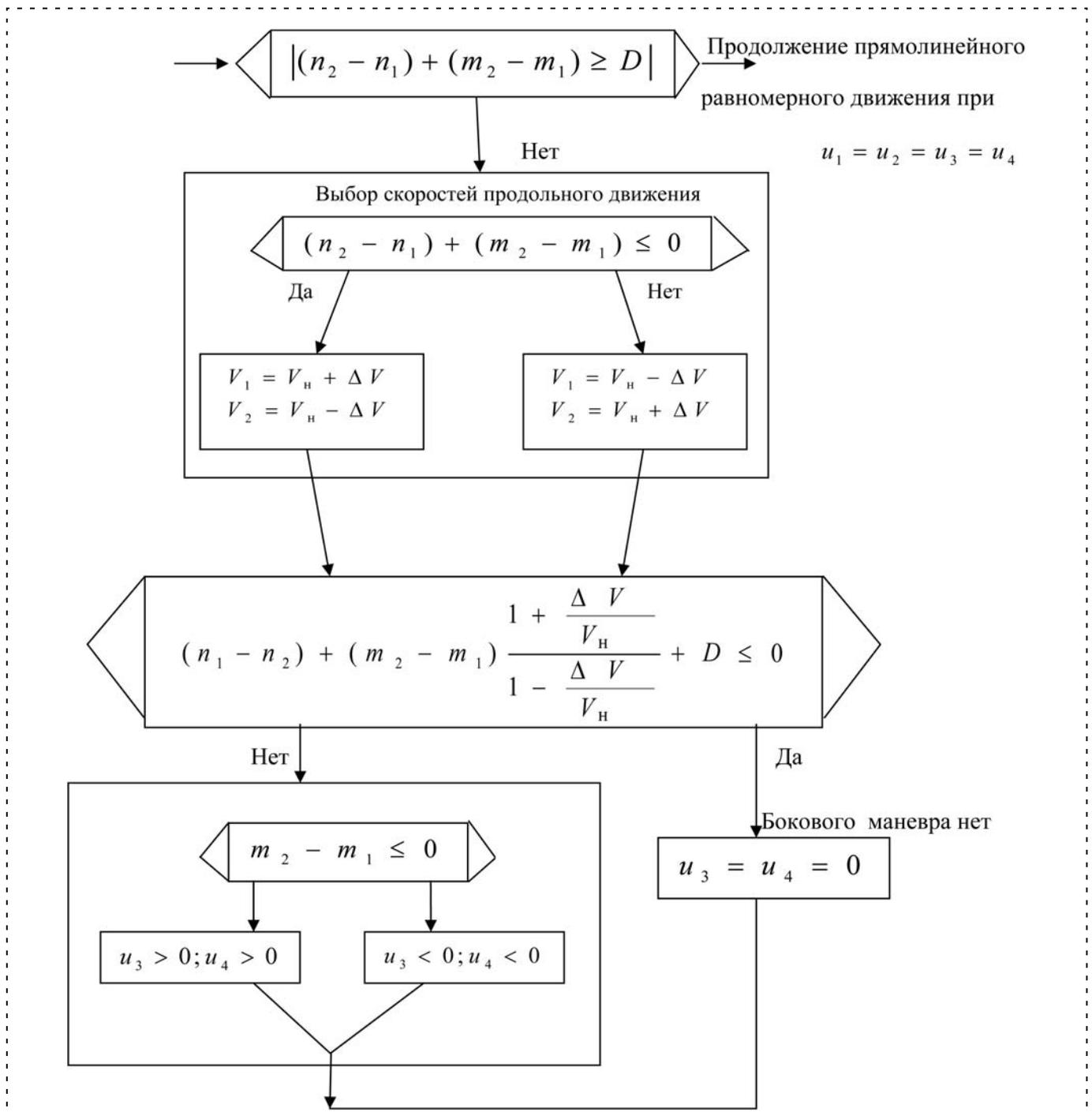


Рис. 2. Блок-схема логического анализа условий поперечного движения транспорта

Синтез управления попутной скоростью продольного движения

Согласно методу динамического программирования [1] функция Беллмана записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 e_1 + \beta_4 Z_2 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \gamma_3 \frac{e_1^2}{2} + \\ & + r_4 Z_2^2 / 2 + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 e_1 + \psi_{23} x_2 e_1 + \\ & + \psi_{14} x_1 z_2 + \psi_{24} x_2 z_2 + \psi_{34} y z_2; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = & \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \varphi_{14} l_1 + \psi_{12} x_2 + p y^2 x_2 + \psi_{13} e_1; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = & \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1 + \varphi_{24} l_1 + p y^2 x_1 + \theta y^2; \quad (7) \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial e_1} = & \beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2 + \varphi_{34} l_1 + \\ & + 2\theta y x_2 + 2\varphi y z + 2p x_1 x_2; \\ -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \min_u \left\{ f_0 + \sum \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \dot{x}_i \right\}. \end{aligned}$$

Запишем уравнение Беллмана:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \min_{u_1} \left[r_0 \frac{u_1^2}{2} + r_1 \frac{(x_1 - m)^2}{2} + r_2 \frac{x_2^2}{2} + \right. \\ & + \frac{1}{2} \frac{r_3 (x_1 - l_1 + D)^2}{1 + \frac{d^2}{(x_1 + D)^2}} + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} y + \\ & + \psi_{14} l_1 + p y^2 x_2) x_2 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y + \\ & + \psi_{24} l_1 + p y^2 x_1 + \theta y^2) (-a_1 x_2 + b_1 u_1) - (\beta_3 + \gamma_3 y + \\ & + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2 + \psi_{34} l_1 + 2\theta y x_2 + 2\varphi y z + 2p x_1 x_2) l_2 + \\ & \left. + (\beta_4 + \gamma_4 z_2 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2 + \psi_{34} y + \varphi y^2) v_2 \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Оптимизируем функцию Беллмана по параметру u_1 :

$$\begin{aligned} f(u_1) = & r_0 \frac{u_1^2}{2} + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y + \\ & + p x_1 y^2 + \theta y^2 + \varphi_{24} l_1) b_1 u_1; \\ f'(u_1) = & r_0 u_1 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1 + \\ & + p x_1 y^2 + \theta y^2 + \varphi_{24} l_1) b_1 = 0. \end{aligned}$$

Отсюда получим искомое оптимальное управление

$$\begin{aligned} u_{1\text{опт}} = & -\frac{b_1}{r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1 + \\ & + p x_1 y^2 + \theta y^2 + \varphi_{24} l_1). \quad (9) \end{aligned}$$

Подставим $u_{1\text{опт}}$ из выражения (9) в уравнение

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0.$$

Тогда получим систему нелинейных алгебраических уравнений для одинаковых множителей степенного полинома в правой части уравнения Беллмана (8).

Решая эту систему уравнений, получим искомые коэффициенты функции Беллмана:

$$\begin{aligned} \psi_{12} = & \frac{\sqrt{(r_1 + r_3) r_0}}{b_1}; \\ \gamma_2 = & \frac{r_0 \left(-a_1 + \sqrt{a_1^2 + \frac{b_1^2 (r_2 + 2\psi_{12})}{r_0}} \right)}{b_1^2}; \\ \psi_{24} = & \frac{-r_3}{a_2 \left(a_1 + a_2 + \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \right) + \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12}}; \\ \psi_{14} = & \psi_{24} \left(a_1 + a_2 + \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \right); \quad p = \sqrt{\frac{r_3 r_0}{D b_1^2 \psi_{24}}}; \\ \gamma_1 = & \psi_{12} \left(a_1 + \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \right); \quad \theta = \frac{2 r_3 r_0}{D b_1^2 \psi_{24}}; \quad a_2 = 0; \quad (10) \\ \Delta = & \left[\frac{\psi_{12} \psi_{24} b_1^2 v_2}{4 \theta r_0 (v_1 + w)} - (v_1 + w) \left(a_1 + \frac{b_1^2 \gamma_2}{r_0} \right) \right]^2 - \\ & - 2 \psi_{12} \frac{b_1^2}{\theta r_0} \left[\psi_{12} \gamma_2 \frac{b_1^2}{r_0} - r_1 m + r_3 D + \psi_{14} v_2 - 2 \theta (v_1 + w)^2 \right]; \\ \psi_{23} = & \left[-\frac{\psi_{12} \psi_{24} b_1^2 v_2}{4 \theta r_0 (v_1 + w)} + (v_1 + w) \times \right. \\ & \left. \times \left(a_1 + \frac{b_1^2 \gamma_2}{r_0} \right) + \sqrt{\Delta} \right] \theta \frac{r_0}{\psi_{12} b_1^2}; \\ \beta_2 = & \left[2 r_3 - \frac{b_1^2 \psi_{23} \psi_{24} v_2}{2 r_0 (v_1 + w)} - \frac{b_1^2 \psi_{23}^2}{r_0} - \frac{2 b_1^2 \gamma_2 \theta}{r_0} \right] \frac{r_0}{2 b_1^2 \theta}; \\ \psi_{13} = & \frac{\left(-r_1 m + r_3 D + \psi_{14} v_2 - \frac{b_1^2 \beta_2 \psi_{12}}{r_0} \right)}{v_1 + w}. \end{aligned}$$

Решение этих уравнений позволяет найти в квадратурах оптимальное управление

$$u_1^* = -\frac{b_1}{r_0} \left[\gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \frac{(\beta_2 + \psi_{24} l_1)}{\left(1 - \theta \frac{d^2}{\beta_2}\right)} \right]. \quad (11)$$

Аналогичным образом синтезируется оптимальное управление u_2 попутным движением другого ТС [2]:

$$u_2^* = -\frac{b_2}{r_0} \left[\gamma_2 l_2 + \psi_{12} l_1 + \frac{(\beta_2 + \psi_{24} x_1)}{\left(1 - \theta \frac{d^2}{\beta_2}\right)} \right]. \quad (12)$$

Синтез оптимального управления боковым движением транспорта при сближении

Для этого случая функция Беллмана записывается аналогично формуле (7), но только вместо координат x_1, x_2, l_1 используются координаты z_1, z_2, y_1 . Тогда можно показать, что оптимальные управления u_3 и u_4 соответственно равны

$$u_3^* = -\frac{b_2}{r_0} \left(\gamma_2 z_2 + \psi_{12} z_1 + \frac{\beta_2 + \psi_{24} x_1}{1 - \theta \frac{d^2}{\beta_2}} \right); \quad (13)$$

$$u_4^* = -\frac{b_2}{r_0} \left(\gamma_2 y_2 + \psi_{12} y_1 + \frac{\beta_2 + \psi_{24} z_1}{1 - \theta \frac{d^2}{\beta_2}} \right).$$

Формулы (11)–(13) для оптимального управления учитывают взаимное движение двух ТС, так как в каждой формуле присутствуют координаты бокового и попутного движений и их относительное расстояние d .

Моделирование продольного и бокового движения двух ТС при пересечении их маршрутов

Компьютерное моделирование движения ТС в соответствии с их динамическими свойствами (1)–(4) и полученными законами управления (12) и (13) проводили в среде MATLAB на примере сближения двух речных судов.

Было принято, что суда движутся на пересекающихся под углом 90° курсах с одинаковой скоростью $V_H = 3,6$ м/с. Начало управляемого движения осуществляется с одинаковых расстояний до точки встречи C_0 :

$$n_2(0) = -m_2(0) = 70 \text{ м.}$$

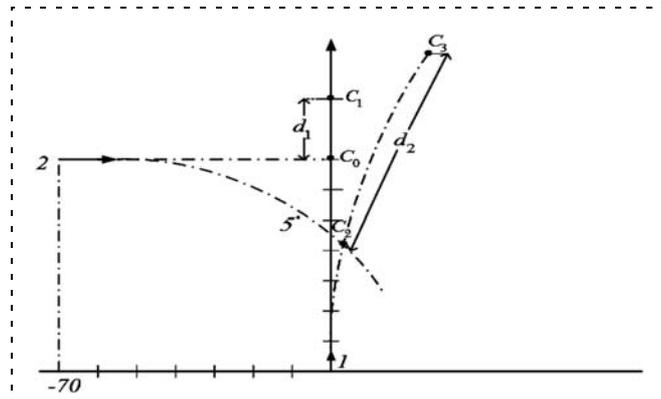


Рис. 3. Результаты моделирования одновременного бокового и продольного движения речных судов

Сама исходная точка встречи имеет координаты $m_c = 0; n_c(0) = 70$. Ясно, что $\Delta t = 0$ и по условию (7) величина $d = 0$, т. е. столкновение неизбежно. Поэтому, пользуясь известным правилом дорожного движения "отсутствие помехи справа", второе ТС должно уступить право беспрепятственного движения первому, которое должно увеличить свою попутную скорость до величины $V_H + \Delta V$. Соответственно, второе ТС должно снизить свою скорость до величины $V_H - \Delta V$. При моделировании было принято, что $\Delta V = 0,2 V_H$, а значение безопасной дистанции $D = 50$ м.

Каждому судну необходимо осуществить дополнительный боковой маневр вправо, так как $m_2(0) < 0$.

Моделирование одновременного продольного и бокового движений обоих судов позволило найти третью точку C_2 пересечения путей, показанную на рис. 3, достижению которой соответствуют следующие значения:

$$t_1 = 10 \text{ с}; t_2 = 25 \text{ с}; \Delta t_2 = 15 \text{ с}; \hat{d}_2 = 60 \text{ м.}$$

Из рис. 3 видно, что когда второе судно, двигаясь с малой скоростью, достигнет точки C_2 , первое судно окажется в точке C_3 на расстоянии 60 м, превосходящем допустимую величину $D = 50$ м. Значит, предпринятых мер достаточно для безопасного движения.

Однако для пассажирских воздушных судов возможности регулирования тяги двигателя в нужном диапазоне ограничены, и тем более весьма малы допустимые перегрузки при маневрировании. Поэтому в этом случае остается последняя возможность — пролететь над точкой встречи C_0 на разной высоте.

Анализ условий пересечения заданных линий пути воздушных судов при пролете точки встречи на разной высоте

Вопросы безопасности пересечения траекторий движения также остро стоят на практике при организации прилета и вылета на наиболее загруженных аэродромах. Особенно это актуально для таких крупных аэроузлов, как московский, который вклю-

чает в себя три базовых аэродрома: Внуково, Домодедово и Шереметьево. Существует ряд ситуаций при управлении воздушным движением, в которых воздушные суда (ВС) должны изменить свой план полета и попасть на новую, заданную линию пути в определенном порядке. К таким случаям относится, в частности, ситуация внезапного изменения условий посадки на различные ВПП по метеорологическим или техническим причинам. Проблема перенацеливания группы ВС в московском узлом диспетчерском районе (МУДР) тесно связана со структурой воздушного пространства, которая может существенно меняться с изменением хотя бы одного из восьми посадочных курсов базовых аэродромов Внуково(W), Домодедово(D), Шереметьево(Sh). Всего получается 2^4 вариантов структуры воздушного пространства.

Практическое решение данной задачи требует учета многочисленных факторов внешней среды, основным из которых являются погодные условия. Так, изменение или неустойчивое направление ветра на взлетно-посадочной полосе может привести к перемене посадочного курса хотя бы одного

из трех аэродромов МУДР, что вносит существенные изменения в структуры стандартных маршрутов.

На рис. 4 представлена структура маршрутов вылета и прилета. Изменения структуры стандартных маршрутов вылета-прилета вследствие изменения конфигурации посадочных курсов довольно часто встречается на практике. На рис. 4 также показана в виде петли схема захода на трассу, называемая "тромбоном", которая в первом приближении состоит из двух участков. На первом начальном участке есть траектория возможного подлета к трассе на разной высоте. После полета по этой траектории воздушные суда оказываются на одной высоте и попадают на второй участок, имеющий вид петли.

Если в начале петли есть возможность выйти на трассу сразу, самолет разворачивается и входит в эшелон захода на посадку. Если трасса занята, то самолет летит по петле дальше, пока эшелон захода на посадку занят. Таким образом, возможная очередь судов рассасывается, и организуется их заход на посадку на безопасных дистанциях друг от друга.

Ясно, что у каждой трассы захода на посадку на ту или иную ВПП должен быть свой "тромбон", на

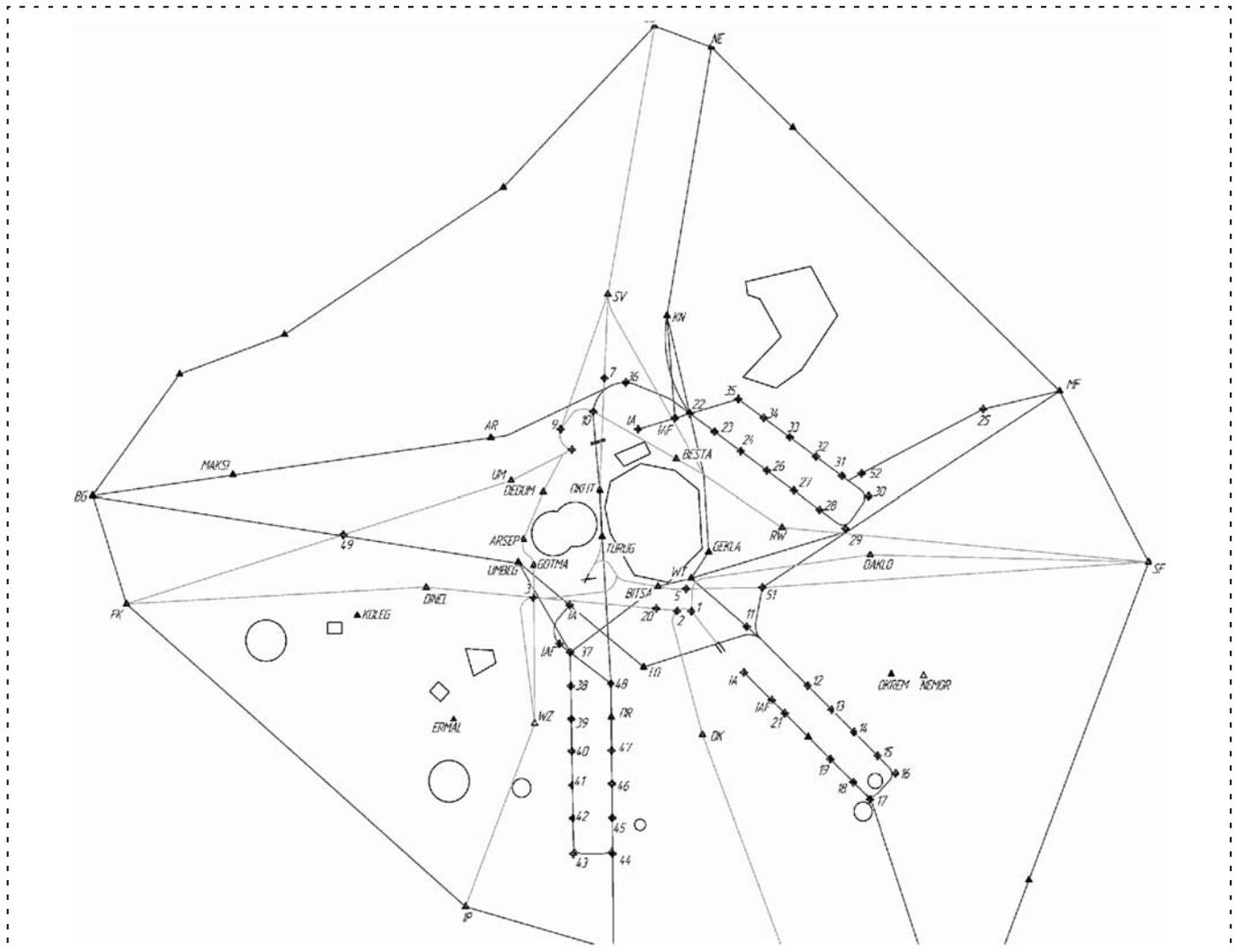


Рис. 4. Организация прилета-вылета для конфигурации посадочных курсов (014/316/245)

котором исключена возможность сближения судов и пересечения их маршрутов.

Данная задача может интерпретироваться как задача "автоматизации векторения", т. е. задача изменения ранее заданных и отчасти выполненных условий путем задания дополнительных, неформализованных заявок в целях оптимальной адаптации к новым условиям. При перелете воздушных судов с одной трассы на другую опасного сближения при пересечении их маршрутов можно избежать, если после возникновения команды на "перевекторение" сразу потребовать перейти воздушным судам на разные эшелоны по высоте — например, при движении судов вокруг московского аэроузла в одну сторону по часовой стрелке — снизиться на $\Delta H = 100 \dots 200$ м, а при их движении против часовой стрелки — подняться на величину ΔH . Тогда при встречном пересечении этих маршрутов в любой точке гарантирована безопасность полета.

Указанный маневр будет сопряжен с первыми дополнительными потерями ΔE_1 . Вторые дополнительные потери топлива ΔE_2 возникнут, когда воздушные суда подлетят к вновь назначенным трассам и попадут в очередь на обслуживание соответствующего "тромбона". В этой ситуации судам придется вновь вернуться на посадочную высоту H_0 — одним судам путем подъема, другим — путем снижения.

Суммарные потери $\Delta E_1 + \Delta E_2$, естественно, должны быть учтены при понижении динамических

приоритетов тех судов, у которых число пересечений с другими маршрутами будет наибольшим. Количественная оценка потерь топлива на маневрирование по высоте требует отдельных исследований и выходит за рамки данной работы.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Найдены условия безопасного сближения ТС, при которых необходим как режим их продольного движения с разными попутными скоростями, так и дополнительный боковой маневр в нужном направлении.

2. При ограниченных возможностях изменения попутной скорости необходим либо дополнительный боковой маневр для наземных транспортных средств, либо управляемый разновысотный пролет над точкой встречи для воздушных судов.

3. Предложенные алгоритмы логического анализа и управления могут быть реализованы в виде системы автоматического управления, что особенно важно для беспилотной авиации.

Список литературы

1. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
2. Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо, Чан Ван Туен. Решение задачи динамического программирования при безопасном попутном движении воздушных судов // Труды МАИ. 2012. № 54.

УДК 007.004.3

Л. Г. Быстров, инженер-программист 1 категории,
А. А. Попов, инженер-программист 1 категории,
Д. П. Тетерин, главный конструктор, д-р техн. наук,
tdp@kber.ru,
ОАО "КБ Электроприбор", г. Саратов

Методика оценки работоспособности элементов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях произвольных входных возмущающих воздействий

Представлена методика оценки работоспособности бортовых систем управления летательных аппаратов в режиме времени, близком к реальному, использующая оригинальные подходы к решению задач текущей пассивной параметрической идентификации динамических характеристик элементов систем и их математическому моделированию с использованием вычислительных средств специального назначения.

Ключевые слова: летательные аппараты, работоспособность, идентификация, моделирование, высокая точность

Введение

В настоящее время перед предприятиями оборонно-промышленного комплекса России, ведущими разработку летательных аппаратов (ЛА) нового поколения, поставлена задача создания высокоточных средств контроля и испытания систем управления ракетных и авиационных комплексов. Одной из отличительных особенностей подобных средств является наличие в составе их функционального (прикладного) программного обеспечения модулей оценки работоспособности систем автоматического управления и их элементов в условиях произвольных входных управляющих воздействий [1].

Выполнение поставленной задачи с использованием традиционных методов идентификации признаков, моделирования развития и прогнозирования влияния отказов в ряде случаев оказывается затруднительным по причинам:

- недостаточной точности приближенных численных методов идентификации и моделирования динамических характеристик высокоточных систем управления и их элементов;

- неприемлемо длительного времени моделирования систем управления средних и высоких порядков;
- ограниченной производительности, объемов памяти и разрядности шины данных процессоров и микроконтроллеров, разрешенных Министерством обороны РФ к использованию в составе образцов техники военного назначения.

В данной статье обсуждается методика оценки работоспособности бортовых систем управления (БСУ) ЛА в условиях произвольных входных управляющих воздействий по результатам идентификации и моделирования их динамических характеристик.

Особенности методики оценки работоспособности БСУ ЛА

Содержание методики следующее.

1. Измерение и фильтрация реакции системы на произвольное возмущающее воздействие на отрезке времени Δt , где $\Delta t \rightarrow 0$.

2. Аппроксимация результатов измерения входного и выходного сигналов $x(t)$ и $y(t)$ квазиполиномами фиксированного порядка (суммами конечного числа квазиодночленов вида $At^k e^{\alpha} \cos \beta t$ или $At^k e^{\alpha} \sin \beta t$, где $t, A, \alpha, \beta \in \mathbb{R}, k \in \mathbb{N}$). Порядок полиномов определяется на этапе разработки системы и совпадает с порядком эталонной математической модели.

3. Текущая пассивная идентификация динамических характеристик системы с использованием нового способа решения обратной задачи по отношению к обыкновенным линейным дифференциальным уравнениям. Построение по результатам пассивной идентификации передаточной функции модели.

4. Программное моделирование реакции построенной модели системы на тестовые возмущающие воздействия, определяемые Техническим заданием (Техническими условиями) на БСУ.

5. Сравнение результатов моделирования динамических характеристик системы с эталонными значениями (допусковыми зонами), указанными в Техническом задании (Технических условиях).

6. Принятие решения о состоянии системы управления (работоспособна либо неработоспособна).

Задача текущей пассивной параметрической идентификации динамических характеристик элементов стационарных БСУ решается в следующей постановке.

Рассматривается динамическая система с одним входом и одним выходом, непрерывная на отрезке времени $\Delta t \rightarrow 0$. На вход системы подается непрерывное произвольное возмущающее воздействие $\chi(t)$. Реакция системы на возмущающее воздействие есть измеряемый квазиполином $y(t)$. Входной шум и помехи измерения отсутствуют или подверглись предварительной фильтрации.

Необходимо по результатам измерения реакции системы на возмущающее воздействие построить ее модель в виде ОДУ с постоянными коэффициентами и начальными условиями (НУ) в точке $t = 0$.

Усовершенствованная методика идентификации заключается в вычислении по функции $y(t)$ известными аналитическими методами интегральных преобразований Лапласа дробно-рациональной функции $W(s)$, по коэффициентам знаменателя которой строится модель системы в виде однородного ОДУ, а с помощью коэффициентов числителя вычисляются начальные условия в точке $t = 0$.

Алгоритмическая реализация методики следующая [2].

1. Найти дробно-рациональную функцию $W(s)$ путем вычисления прямого преобразования Лапласа от квазиполинома $y(t)$ — реакции системы на входное возмущающее воздействие:

$$W(s) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} b_i s^i}{\sum_{i=0}^n a_i s^i}.$$

2. По коэффициентам полинома знаменателя дробно-рациональной функции $W(s)$ построить модель системы в виде однородного дифференциального уравнения:

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = 0.$$

3. По коэффициентам полиномов числителя и знаменателя дробно-рациональной функции $W(s)$ вычислить начальные условия для ОДУ в точке $t = 0$:

$$y(0) = b_{n-1};$$

$$\frac{d^k y(0)}{dt^k} = b_{n-k-1} - \sum_{i=0}^{k-1} a_{i+n-k} \frac{d^i y(0)}{dt^i},$$

$$k = \overline{1, n-1}.$$

4. Для проверки адекватности полученной модели решить построенное уравнение с вычисленными начальными условиями и убедиться, что его решение эквивалентно исходной функции $y(t)$.

Новизна методики состоит в порядке вычисления начальных условий, которые ранее назначались априорно и не учитывали исходное состояние системы до момента приложения возмущающего воздействия.

В основе модифицированных методов моделирования реакции динамической модели системы на тестовые возмущающие воздействия лежит метод построения матричной экспоненты. Идея метода основана на методе Гамильтона-Кэлли, который был обобщен на случай кратных корней характеристического полинома исходной матрицы. Отличие метода заключается в использовании матрицы базисных функций B при переменных коэффициентах

общего решения однородного уравнения и обобщенной матрицы Вандермонда W [3].

Алгоритм вычисления матричной экспоненты от матрицы $M \in R^{n \times n}$ следующий:

1. По элементам числовой матрицы M известными аналитическими методами построить характеристический полином $\chi(s)$, вычислить его различные корни и их кратности: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p; m_1, m_2, \dots, m_p$, где λ_i — i -й корень полинома; m_i — кратность i -го корня полинома, $i = \overline{1, p}$; p — число различных корней полинома.

2. По корням характеристического полинома $\chi(s)$ сформировать матрицу базисных функций при коэффициентах общего решения однородного уравнения $B \in R^{1 \times n}$ и матрицу Вронского $W \in R^{n \times n}$ от нулевого аргумента для случая кратных корней:

$$B = (B^1 \in R^{1 \times m_1}, B^2 \in R^{1 \times m_2}, \dots, B^p \in R^{1 \times m_p}) = \\ = [(b_1^1, b_2^1, \dots, b_{m_1}^1), (b_1^2, b_2^2, \dots, b_{m_2}^2), \\ \dots, (b_1^p, b_2^p, \dots, b_{m_p}^p)],$$

где $b_j^i = e^{\lambda_i t} t^{j-1}$, $i = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m_i}$;

$$W(0) = V(\lambda_1, \dots, \lambda_p) = (V^1 \in R^{n \times m_1}, V^2 \in R^{n \times m_2}, \\ \dots, V^p \in R^{n \times m_p}),$$

где

$$V^k = (v_{i,j}^k) = \\ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_k & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_k^2 & 2\lambda_k & 2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_k^{n-1} & (n-1)\lambda_k^{n-2} & (n^2-3n+2)\lambda_k^{n-2} & \dots & \dots \end{bmatrix},$$

$$v_{i,j}^k = (i-1)v_{i-1,j-1}^k, \quad i = \overline{2, n}, \quad j = \overline{2, m_k}, \quad k = \overline{1, p}.$$

3. Вычислить вектор-строку $C \in R^{1 \times n}$ следующим образом:

$$C = [c_1, c, \dots, c_n] = BW^{-1}.$$

4. Найти численную матричную экспоненту по формуле:

$$e^{Mt} = \sum_{i=1}^n c_i M^{i-1}.$$

Реализация алгоритма в составе вычислительных средств военного назначения позволила применительно к системам рассматриваемого в работе класса в 5...10 раз сократить время моделирования. Эффективность метода обусловлена его матричной

формализацией и использованием аппаратных особенностей ЭВМ.

Идея предлагаемого в работе метода моделирования реакции элементов линейных стационарных систем состоит в представлении решения неоднородного уравнения с правой частью в виде суммы квазиполинома и функции Дирака (Хевисайда) в виде суммы двух составляющих — вынужденной и свободной [4]. Вынужденная составляющая является частным решением исходного уравнения с однородными начальными условиями. Свободная составляющая представляет собой решение однородного дифференциального уравнения, определяемого левой частью исходного ОДУ с начальными условиями, вычисляемыми с учетом вынужденной составляющей решения. Элементом новизны в данном случае является использование усовершенствованного метода построения численной матричной экспоненты.

Рассмотрим алгоритм решения уравнения вида

$$\sum_{i=1}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = K(t) + A\delta(k, t-d)$$

с начальными условиями Коши в точке $t = c$

$$\frac{d^i y(c)}{dt^i} = Y_i, \quad i = \overline{0, n-1},$$

где a_i — значение коэффициента при i -й производной от функции $y(t)$; $K(t)$ — произвольный квазиполином; A — значение амплитуды функции Дирака; k — порядок функции Дирака, $k < n$; d — смещение аргумента t функции Дирака; c — аргумент начальных условий; Y_i — комплексное значение i -й производной от функции $y(t)$ в точке $t = c$.

Алгоритм включает в себя восемь шагов.

1. Вычислить отношение прямого преобразования Лапласа от квазиполинома $K(t)$ к характеристическому полиному, построенному по левой части исходного уравнения

$$\varphi(s) = L[K(t)] \left/ \sum_{i=0}^n a_i s^i \right. = \frac{u-1}{\sum_{i=0}^{u-1} b_i s^i} \left/ \sum_{i=0}^u d_i s^i \right.$$

2. Найти матрицу $Y_\varphi \in R^{u \times 1}$, первый элемент которой $y_\varphi(t)$ является решением ОДУ, определяемого левой частью и квазиполиномиальной составляющей правой части исходного уравнения

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = K(t),$$

при однородных (нулевых) начальных условиях в точке $t = 0$

$$\frac{d^i y(0)}{dt^i} = 0, \quad i = \overline{0, n-1},$$

а остальные элементы вектора — производные $d^k y_\varphi(t)/dt^k$, $k = \overline{1, u-1}$.

Матрицу строить с использованием разработанного в рамках исследования метода вычисления матричной экспоненты по формуле

$$Y_\varphi = [e^{F_\varphi t} (B_\varphi W_\varphi)^T]_{t=0},$$

где $F_\varphi \in R^{u \times u}$ — матрица в форме Фробениуса, формируемая по коэффициентам полинома знаменателя функции $\varphi(s)$:

$$F_\varphi = (f_{i,j}) = \begin{cases} -d_{j-1} & \text{при } i = u; \\ 1 & \text{при } i = j-1 \text{ и } i \neq u, \text{ где } i = \overline{1, u}, j = \overline{1, u}; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$B_\varphi \in R^{1 \times u}$ — матрица значений коэффициентов полинома числителя дробно-рациональной функции $\varphi(s)$ в порядке возрастания индексов:

$$B_\varphi = [b_0, b_1, \dots, b_{u-1}];$$

$W_\varphi = (w_{i,j}) \in R^{u \times u}$ — матрица Вронского, в которой первая строка — унитарная (нулевая с единицей в последней позиции), а элементы остальных строк определяются по формуле

$$w_{i,j} = \sum_{k=1}^u w_{i-1,k} \cdot f_{j,k}, \quad j = \overline{1, u}, \quad i = \overline{2, u}.$$

3. Построить отношение прямого преобразования Лапласа от заданной функции Дирака к характеристическому полиному, сформированному по левой части исходного ОДУ, при $d = 0$:

$$\psi(s) = L[\delta(k, t)] \Big/ \sum_{i=0}^n a_i s^i = s^k \Big/ \sum_{i=0}^n a_i s^i.$$

4. Определить матрицу $Y_\psi \in R^{n \times 1}$, первый элемент которой $y_\psi(t)$ является решением ОДУ, определяемого левой частью и функцией Дирака правой части исходного уравнения

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = A \delta(k, t-d),$$

при однородных (нулевых) начальных условиях в точке $t = 0$:

$$\frac{d^i y(0)}{dt^i} = 0, \quad i = \overline{0, n-1},$$

а остальные элементы вектора — производные $d^k y_\psi(t)/dt^k$, $k = \overline{1, n-1}$.

Матрицу строить по формуле

$$Y_\psi = (AH(t)[e^{F_\psi t} (B_\psi W_\psi)^T])_{t=t-d},$$

где $H(t)$ — функция Хевисайда; $F_\psi \in R^{n \times n}$ — матрица в форме Фробениуса, формируемая по коэффициентам полинома знаменателя функции $\psi(s)$:

$$F_\psi = (f_{i,j}) = \begin{cases} -a_{j-1} & \text{при } i = n; \\ 1 & \text{при } i = j-1 \text{ и } i \neq n, \text{ где } i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}; \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

$B_\psi \in R^{1 \times n}$ — матрица значений коэффициентов полинома числителя дробно-рациональной функции $\psi(s)$ в порядке возрастания индексов:

$$B_\psi = [b_0, b_1, \dots, b_{n-1}];$$

$W_\psi = (w_{i,j}) \in R^{n \times n}$ — матрица Вронского, в которой первая строка — унитарная, а элементы остальных строк определяются по формуле

$$w_{i,j} = \sum_{k=1}^n w_{i-1,k} f_{j,k}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i = \overline{2, n}.$$

5. Найти вынужденную составляющую решения, соответствующую частному решению исходного уравнения с однородными начальными условиями

$$y_B(t) = [Y_\varphi]_{1,1} + [Y_\psi]_{1,1} = y_\varphi(t) + y_\psi(t).$$

6. Сформировать матрицу $Y_c \in R^{n \times 1}$ значений смещенных начальных условий:

$$[Y_c]_{i,1} = d^{i-1} y_c(c)/dt^{i-1} = Y_{i-1} - ([Y_\varphi]_{i,1} + [Y_\psi]_{i,1})_{t=c}, \quad i = \overline{1, n}.$$

7. Определить свободную составляющую — решение однородного уравнения, определяемого левой частью исходного ОДУ с начальными условиями, найденными в п. 6:

$$y_c(t) = ([e^{F_\psi t} Y_c]_{1,1})_{t=t-c}.$$

8. Решение заданного неоднородного уравнения с правой частью в виде суммы квазиполинома и функции Дирака (Хевисайда) есть сумма вынужденной и свободной составляющих:

$$y(t) = y_B(t) + y_c(t).$$

Решение неоднородных дифференциальных уравнений в вышеизложенной последовательности позволило в 5...10 раз сократить время моделирования элементов линейных стационарных систем рассматриваемого в работе класса.

Для моделирования линейных нестационарных динамических систем предлагается использовать модифицированный метод Рунге—Кутты. Блок-схема

алгоритма, реализующего модифицированный метод Рунге—Кутты 3-го порядка, приведена на рис. 1. Отличительной особенностью метода является его матричная формализация, позволяющая выполнить замену исходного ОДУ высокого порядка на систему уравнений в форме Коши первого порядка [5].

Результаты проведенных в рамках исследования вычислительных экспериментов показали, что

реализация модифицированного метода Рунге—Кутты в составе программного обеспечения микроконтроллеров (микропроцессоров), имеющих встроенный векторный сопроцессор, позволяет повысить точность приближенного численного моделирования линейных стационарных и нестационарных систем рассматриваемого в работе класса не менее, чем на одну значащую цифру.

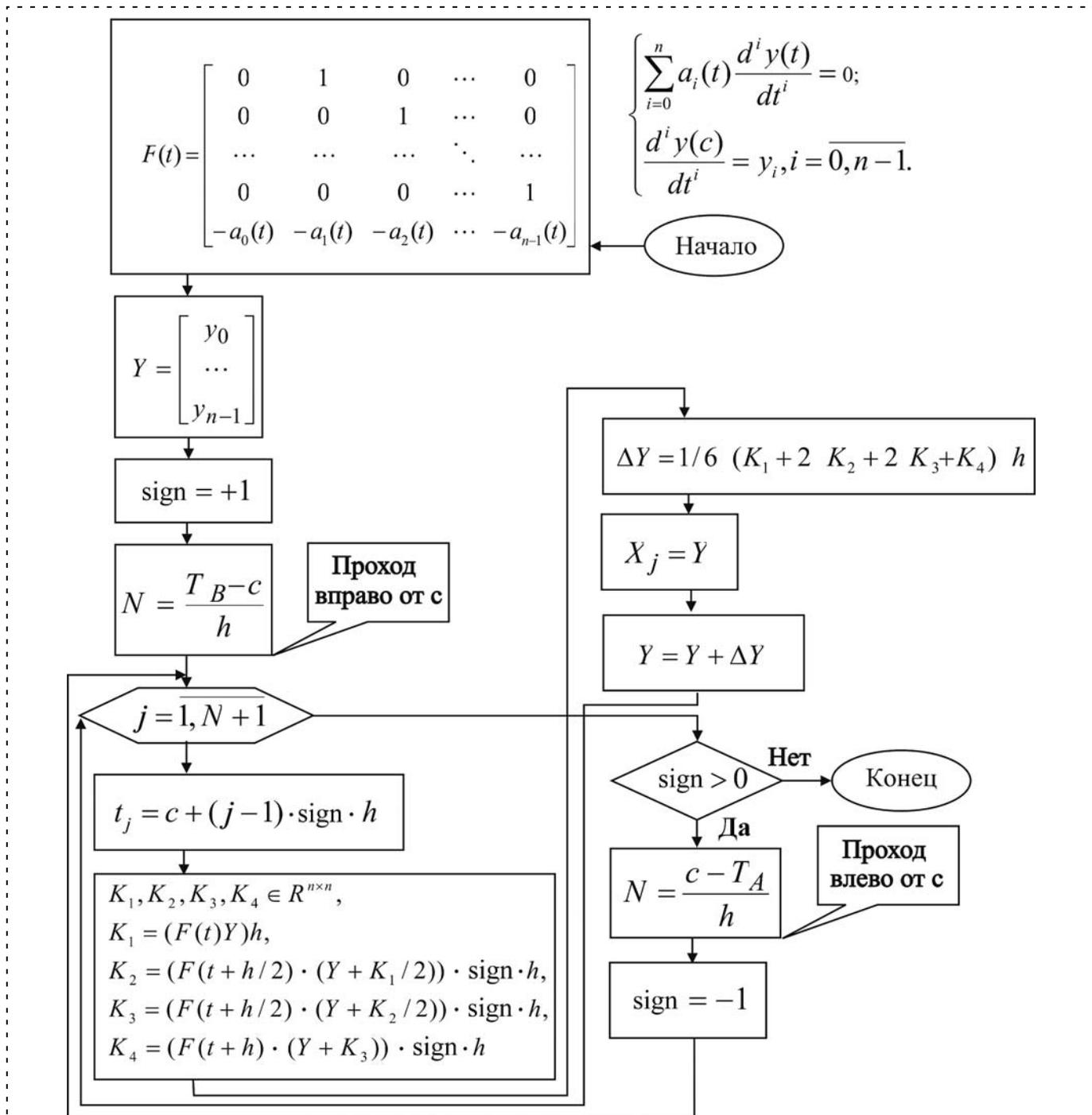


Рис. 1. Алгоритм, реализующий модифицированный метод Рунге—Кутты 3-го порядка, где $a_i(t)$ — значение переменного коэффициента при i -й производной от функции $y(t)$; $Y \in R^{n \times 1}$ — матрица значений начальных условий; sign — признак направления движения по разностной сетке от начальной точки c ; h — шаг решения; N — число узлов сетки; $[T_A; T_B]$ — отрезок поиска решения; $F(t)$ — матрица в форме Фробениуса; X — матрица значений решения в расчетных точках (узлах)

Средство моделирования	Критерии сравнения								
	Время вычислений, с			Точность вычислений, число значащих цифр			Объем оперативной памяти, Мбайт		
	ГТД	$n^{**} = 12$	$n = 24$	ГТД	$n = 12$	$n = 24$	ГТД	$n = 12$	$n = 24$
Maple	1,1	3,2	18,8	16	16	15	4,81	6,7	17,04
Mathematica	2,1	3,7	19,5	16	16	14	4,12	6,5	16,79
MATLAB	1,9	4,1	21,3	15	14	13	5,13	7,5	18,12
МПК*	0,008	0,008	0,09	18	18	18	3	3,02	3,06

* программы, реализующие усовершенствованный метод Рунге—Кутты для моделирования линейных стационарных и нестационарных систем.
** n — порядок ОДУ, взятого в качестве тестовой модели.

Оценка эффективности методики оценки работоспособности БСУ ЛА

Для определения эффективности методики оценки работоспособности элементов систем управления были проведены вычислительные эксперименты. В качестве объекта исследования, отражающего характерные особенности систем управления рассматриваемого класса, был взят канал угловой стабилизации из состава системы управления беспилотного ЛА. Имитировали работу канала при отсутствии отказов, с отказом, не влияющим на работоспособность канала, и катастрофическим отказом. Реализация методики в составе прикладного программного обеспечения специализированного вычислителя военного назначения позволила за время менее 12 мс решить задачи идентификации системы с отказом, моделирования реакции системы на тестовое ступенчатое воздействие (рис. 2, см. вторую сторону обложки) и оценки ее состояния (работоспособна либо неработоспособна).

Дополнительно разработанные вычислительные методы, алгоритмы и программы сравнивали с наиболее эффективными современными пакетами компьютерного моделирования Maple (Waterloo Maple Inc., Канада), Wolfram Mathematica (Wolfram Research Inc., США) и MATLAB/Simulink (MathWorks Inc., США) по критериям "время вычислений", "точность вычислений" и "объем затрачиваемой памяти". Эксперименты проводили с использованием моделей элементов системы управления пер-

спективного газотурбинного двигателя (ГТД) и тестовых моделей 12-го и 24-го порядков (см. таблицу).

Заключение

Изложенная методика обеспечивает сокращение времени моделирования на современных вычислительных средствах специального назначения в 2...10 раз и повышение точности результатов вычислений не менее, чем на одну значащую цифру после запятой.

Список литературы

1. **Перечень** технологий, имеющих важное социально-экономическое значение или важное значение для обороны страны и безопасности государства (критические технологии) / Распоряжение Правительства РФ от 25 августа 2008 г. № 1243-р.
2. **Методы** идентификации динамических характеристик стационарных элементов бортовых систем управления / В. С. Дрогайцев, А. А. Попов и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 4 (42). Вып. 1. С. 65—71.
3. **Решение** линейных дифференциальных уравнений. Аналитико-числовые методы и алгоритмы: Монография. Часть 1 / Л. Г. Быстров, Г. С. Говоренко, А. В. Гориш и др. М.: МГУЛ, 2004. 440 с.
4. **Тетерин Д. П.** Аналитическое решение неоднородных линейных дифференциальных уравнений со сложной правой частью // Доклады Академии военных наук. 2008. № 5 (34). С. 139—146.
5. **Вержбицкий В. М.** Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е., испр. М.: ООО "Издательский дом "ОНИКС 21 век", 2005. 400 с.

С. Ю. Боровик, канд. техн. наук, вед. научн. сотр.,
borovik@iccs.ru,

Ю. Н. Секисов, д-р техн. наук, зав. лаб.,

О. П. Скобелев, д-р техн. наук, гл. научн. сотр.,
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

Институт проблем управления сложными
системами Российской академии наук, г. Самара

Динамические температурные погрешности в каналах термокоррекции семейств градуировочных характеристик системы измерения с кластерами одновитковых вихретоковых датчиков*

Рассматривается тепловая модель одновиткового вихретокового датчика (ОВТД) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде отрезка проводника и встроенной в датчик термопарой (ТП), сигналы которой преобразуются в специально предусмотренном канале системы и после обработки используются в алгоритмах термокоррекции семейств градуировочных характеристик (ГХ) систем измерения координат смещения торцов лопаток компрессора или турбины газотурбинного двигателя (ГТД). Модель позволяет определить температуру горячего спаи (ГСП) ТП при изменении во времени температуры газовой среды в зоне размещения ЧЭ при нестационарных режимах работы ГТД, найти динамическую температурную погрешность как разность температур ЧЭ и ГСП, получить ее количественные оценки для различных значений скорости изменения температуры среды. Приводится также описание такого способа измерения и вычисления температуры среды ЧЭ, который позволяет сохранить применяемый в системе алгоритм термокоррекции в условиях нестационарного режима ГТД при изменении во времени температуры среды в зоне размещения ЧЭ.

Ключевые слова: одновитковый вихретоковый датчик, встроенная в датчик термопара, динамическая температурная погрешность, алгоритм термокоррекции, способ измерения и вычисления температуры чувствительного элемента

Введение

Как правило, системы измерения координат смещения торцов лопаток с кластерами одновиткового вихретокового датчика (ОВТД) предназначены для экспериментальных исследований газотурбинного двигателя (ГТД), работающего в стационарном режиме, когда температура в газовой среде не изменяется во времени (достигая 650 °С в компрессоре и 1500 °С в турбине). Чтобы избежать погрешностей, связанных с температурными изменениями геометрических и электрофизических параметров лопаток, элементов конструкции ОВТД (и в первую очередь чувствительных элементов

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-01032а).

(ЧЭ)), в существующих конструкциях предусмотрены встраиваемые в датчик термопары (ТП), горячие спаи (ГСП) которых расположены на малом расстоянии от ЧЭ [1]. Сигналы ТП преобразуются в специально предусмотренных каналах системы и после обработки, включающей получение физических значений температуры, используются в алгоритмах коррекции семейств градуировочных характеристик (ГХ), представляющих собой зависимости цифровых кодов в каналах ОВТД не только от искомым координат смещений, но и от температуры среды в зоне размещения ЧЭ. Семейство ГХ определяется экспериментально с помощью специально разработанных многокоординатного градуировочного устройства и термостата в предположении идентичности температурных условий в стационарном режиме на объекте и в термостате.

Однако нестационарные режимы работы ГТД сопровождаются тепловыми переходными процессами, которые приводят к изменениям во времени температуры газовой среды, лопаток, статора и элементов конструкции ОВТД, включая ЧЭ и встроенную в датчик ТП. Поскольку в существующих конструкциях ОВТД ГСП ТП заглублены относительно ЧЭ на расстояние 10...12 мм (по технологическим причинам), то можно предположить запаздывание сигнала ТП и появление связанной с ним погрешности при обработке программы, реализующей алгоритм температурной коррекции.

Разность изменяющихся во времени температур среды и ГСП ТП можно классифицировать как динамическую температурную погрешность. Судя по литературным источникам, отсутствуют какие-либо исследования таких погрешностей. Поэтому в данной статье предпринята попытка устранить существующий пробел.

Тепловая модель ОВТД

Обозначив изменения температуры во времени $\theta(t)$, термопары в точке установки ГСП $\theta_{ТП}(t)$ и полагая, что температура ЧЭ ($\theta_{ЧЭ}(t)$) равна температуре среды ($\theta = \theta_{ЧЭ}$), можно представить динамическую температурную погрешность в виде $\Delta\theta = \theta(t) - \theta_{ТП}(t) = \theta_{ЧЭ}(t) - \theta_{ТП}(t)$.

Если предположить, что температура среды $\theta(t)$ ($\theta_{ЧЭ}(t)$) изменяется по линейному закону во времени $\theta_{ЧЭ}(t) = \theta_0 + \alpha_\theta t$, где θ_0 — начальное значение температуры и α_θ — скорость изменения температуры, то задача сводится к определению реакции ГСП на воздействие температуры среды $\theta(t)$ ($\theta_{ЧЭ}(t)$), т. е. функции $\theta_{ТП}(t)$. Найти эту функцию можно с помощью простейшей тепловой модели ОВТД, построенной на основе электротепловых аналогий [2].

Схематическое изображение ОВТД с ЧЭ, токовыми и хвостовой частью, расположенной вне статорной оболочки, представлено на рис. 1, а [1]. На рис. 1, б сплошными линиями изображена эквивалентная схема, в которой напряжения $U_{ЧЭ}$ и $U_{ТП}$ — это аналоги температур $\theta_{ЧЭ}$ и $\theta_{ТП}$ соответ-

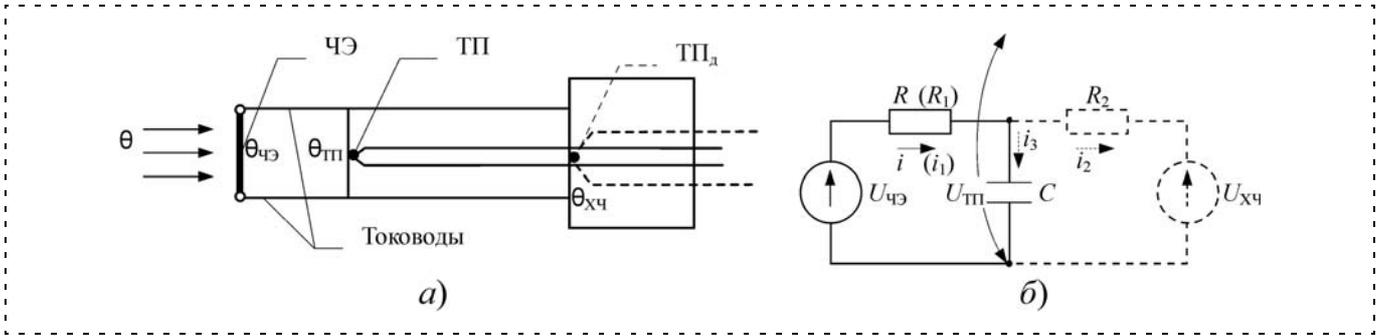


Рис. 1. Схематическое изображение ОВТД (а) и эквивалентная схема (б)

ственно, ток i — аналог теплового потока в головной части токовода, сопротивление R эквивалентно тепловому сопротивлению токовода в головной части, а емкость C — теплоемкости токовода.

Тогда для эквивалентной схемы (рис. 1, б) можно записать следующее уравнение:

$$iR + U_{ТП} = U_{ЧЭ}. \quad (1)$$

С учетом, что $i = C \frac{dU_{ТП}}{dt}$, уравнение (1) примет вид

$$\tau_{ТП} \frac{dU_{ТП}}{dt} + U_{ТП} = U_{ЧЭ}, \quad (2)$$

где $\tau_{ТП} = CR$ — постоянная времени.

В соответствии с используемыми аналогиями и с учетом линейного во времени изменения $\theta_{ЧЭ}(t)$ уравнение (2) примет вид

$$\tau_{ТП} \frac{d\theta_{ТП}}{dt} + \theta_{ТП} = \theta_0 + \alpha_0 t.$$

Воспользовавшись преобразованием Лапласа, нетрудно найти температуру ГСП ТП:

$$\theta_{ТП}(t) = \theta_0 + \alpha_0 t - \alpha_0 \tau_{ТП} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ТП}}} \right]. \quad (3)$$

С учетом (3) получаем динамическую погрешность

$$\Delta\theta(t) = \alpha_0 \tau_{ТП} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ТП}}} \right],$$

а относительная приведенная погрешность находится по формуле

$$\delta_\theta(t) = \frac{\Delta\theta(t)}{\theta - \theta_0} \cdot 100 \% = \frac{\alpha_0 \tau_{ТП} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ТП}}} \right]}{\theta - \theta_0} \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где $(\theta - \theta_0)$ — диапазон изменения температуры в газоздушном тракте.

Из формулы (4) следует, что погрешность $\delta_\theta(t)$ изменяется во времени: при $t \rightarrow 0$ $\delta_\theta \rightarrow 0$, а при $t \gg \tau_{ТП}$ $\delta_\theta \rightarrow \text{const}$ и определяется скоростью изменения температуры (α_0) и постоянной времени ТП ($\tau_{ТП}$), а точнее — их произведением ($\alpha_0 \tau_{ТП}$).

Оценка динамических погрешностей

Для количественных оценок погрешности δ_θ предполагается, что объект исследования — компрессор высокого давления с изменениями температуры в диапазоне от $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ до $\theta = 650^\circ\text{C}$. Возможные скорости изменения температуры $\theta(\theta_{ЧЭ})$ невелики и составляют $\alpha_{01} = 0,05^\circ\text{C/c}$, $\alpha_{02} = 0,2^\circ\text{C/c}$, и $\alpha_{03} = 0,5^\circ\text{C/c}$. Постоянная времени $\tau_{ТП} = 53$ с найдена по тепловому сопротивлению $R = 4,26$ К/Вт и теплоемкости* $C = 12,44$ Дж/К.

На рис. 2, а представлены зависимости $\theta(t)$, а на рис. 2, б — относительная приведенная погрешность $\delta_\theta(t)$.

Анализ погрешностей $\delta_\theta(t)$ показывает, что для скоростей изменений температуры $\alpha_0 = 0,05^\circ\text{C/c}$ и $\alpha_0 = 0,2^\circ\text{C/c}$ они составляют 0,04 и 1,7 % соответственно. Однако в режимах приемистости или сброса газа ($\alpha_0 = 0,5^\circ\text{C/c}$) погрешность достигает 4,2 % и более.

Способы измерения и вычисления температуры среды (ЧЭ)

Очевидно, что используемый в системе измерения алгоритм термокоррекции, ориентированный на стационарный режим работы ГТД, в режимах приемистости и сброса газа, когда температура среды в зоне размещения ЧЭ изменяется во вре-

* Приблизительно тепловое сопротивление R и теплоемкость C могут быть определены по известным формулам теории теплопередачи [3]: $R = \frac{l}{\lambda S}$; $C = mc$, где l — длина участка токовода,

S — площадь поперечного сечения токовода ($S = \pi(R_n^2 - R_b^2)$ для головной (полый) части токовода (R_n — наружный радиус токовода, R_b — внутренний радиус токовода)), λ — теплопроводность материала токовода, m — масса токовода ($m = \rho V$, где ρ — плотность материала, V — объем токовода), c — удельная теплоемкость. В рассматриваемом примере они определялись для датчика типа ОВТД-К-3(Л) [1] ($R_n = 5$ мм, $R_b = 4,5$ мм, длина токовода в головной части $l = 7$ мм, материал — латунь ($\lambda = 110$ Вт/м·К, $\rho = 8400$ кг/м³; $c = 0,377$ кДж/кг·К)).

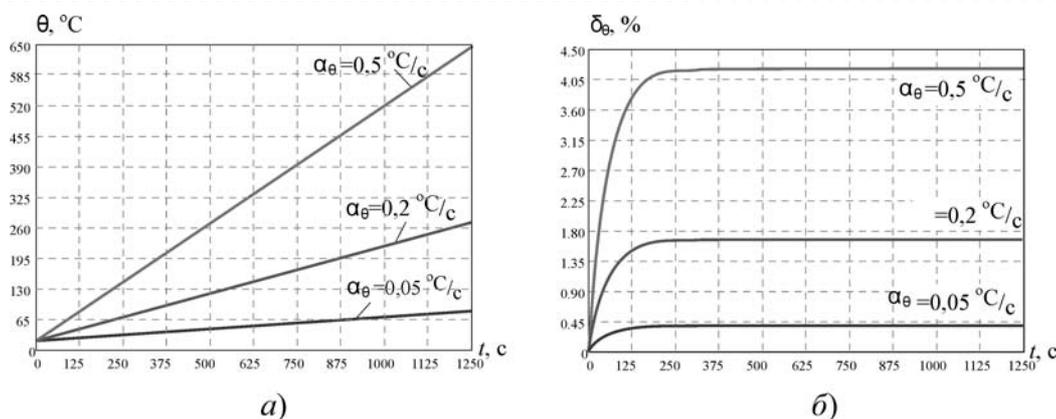


Рис. 2. Изменения температур $\theta(t)$ (а), а также относительная приведенная погрешность $\delta_\theta(t)$ (б)

мени, будет обрабатывать недостоверные данные о температуре среды (ЧЭ), что связано с существенным увеличением рассмотренных выше динамических погрешностей. Вместе с тем, сохранить алгоритм термокоррекции и избежать недостоверности в его исходных данных позволяет метод измерения и вычисления температуры среды (ЧЭ), предложенный в работе [4]. Метод предусматривает, во-первых, использование дополнительной ТП (ТП_д), установленной в хвостовой части ОВТД (см. рис. 1, а (штриховая линия)), а во-вторых, применение формулы, позволяющей вычислить $\theta_{ЧЭ}(t)$ по результатам текущих измерений ТП и ТП_д*:

$$\theta_{ЧЭ} = \tau_{ТП} \frac{\Delta\theta_{ТП}}{\Delta t} + (1 + k_R)\theta_{ТП} - k_R\theta_{ХЧ}, \quad (5)$$

где Δt — шаг дискретизации во времени; $\Delta\theta_{ТП}$ — приращение температуры ТП в головной части ОВТД за время Δt ; $\theta_{ХЧ}$ — температура, измеренная ТП_д в хвостовой части датчика; $\tau_{ТП} = R_1 C = RC$ — постоянная времени, коэффициент $k_R = R_1/R_2$ (см. рис. 1, б (штриховая линия)).

* Выражение (5) получено с помощью эквивалентной схемы (см. рис. 1, б), дополненной штриховыми изображениями элементов схемы и ее параметров ($i_1 = i$, i_2 , i_3 — аналоги тепловых потоков, R_2 — аналог теплового сопротивления токовода и хвостовой части ОВТД (R_2 вычисляется по формуле, приведенной в предыдущей сноске, при этом длина токовода, за исключением головной части, $l = 50$ мм, а площадь поперечного сечения токовода вычисляется по формуле $S = \pi R_n^2$). Для схемы рис. 1, б можно составить систему уравнений [4]

$$\begin{cases} i_1 R_1 + U_{ТП} = U_{ЧЭ}; \\ i_2 R_2 + U_0 = U_{ТП}; \\ i_1 - i_2 - i_3 = 0. \end{cases}$$

Выразив i_1 через i_2 и i_3 с учетом, что $i_3 = C \frac{dU_{ТП}}{dt}$, можно записать: $\tau_{ТП} \frac{dU_{ТП}}{dt} + (1 + k_R)U_{ТП} - k_R U_{ХЧ} = U_{ЧЭ}$.

С учетом используемых аналогий это уравнение примет следующий вид: $\tau_{ТП} \frac{d\theta_{ТП}}{dt} + (1 + k_R)\theta_{ТП} - k_R\theta_{ХЧ} = \theta_{ЧЭ}$.

Очевидно, что полученное выражение соответствует формуле (5), если выполнить замену $\frac{d\theta_{ТП}}{dt} \approx \frac{\Delta\theta_{ТП}}{\Delta t}$.

Рассчитанные на каждом шаге значения $\theta_{ЧЭ}$ (т. е. θ) используются далее в алгоритмах коррекции*.

Заключение

Разработана тепловая модель ОВТД со встроенной ТП, с помощью которой в предположении линейного во времени изменения температуры газовой среды в зоне размещения ЧЭ датчика получено выражение относительной приведенной температурной погрешности. Показано, что при скоростях изменения температуры газовой среды до $0,2$ °C/c максимальные значения погрешности не превышают $1,7$ %. Однако в режимах приемистости или сброса газа (скорость изменения температуры газовой среды порядка $0,5$ °C/c) погрешность достигает уровня $4,2$ %. Приведено описание метода, предусматривающего применение дополнительной ТП в хвостовой части ОВТД и формулы, обеспечивающей вычисление текущих значений температуры среды (ЧЭ), изменяющихся во времени, по результатам измерений обеих ТП (в головной и хвостовой части ОВТД) и использующего эти данные как исходные в алгоритмах термокоррекции, ориентированных на стационарные режимы работы ГТД.

Список литературы

1. **Методы** и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю. Н. Секисова, О. П. Скобелева. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. 188 с.
2. **Юдаев Б. Н.** Теплопередача: Учеб. для втузов. М.: Высшая школа, 1973. 360 с.
3. **Теплофизика:** Учеб. для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др. М.: Высшая школа, 2000. 671 с.
4. **Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н.** Об использовании тепловой модели одновиткового вихретокового датчика для коррекции температурных погрешностей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. VII Междунар. конференции. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2005. С. 175–180.

* В традиционных алгоритмах температурной коррекции [1] используются температуры, вычисленные непосредственно по сигналам единственной ТП, встроенной в ОВТД.

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2012 году

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕХАТРОНИКИ

- Осипов Ю. М., Щербинин С. В.** О мехатронике как научной основе создания высокотехнологичной продукции. № 8.
- Сергеев С. Ф.** Мехатроника как конвергентная научно-практическая дисциплина. № 1.

МЕТОДОЛОГИЯ И ФИЛОСОФИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

- Виттих В. А.** Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки. № 1.
- Виттих В. А., Игнатъев М. В., Смирнов С. В.** Онтологии в интерсубъективных теориях. № 5.

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Алиев Ф. А., Исмаилов Н. А.** Об одном методе линеаризации для нелинейных систем. № 6.
- Анисимов Д. Н., Мякинков Д. А.** Проблемы снижения погрешностей оценок параметров нелинейных динамических объектов при идентификации методом экспоненциальной модуляции. № 3.
- Бобцов А. А., Ефимов Д. В., Пыркин А. А., Золгадри А.** Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей. № 2.
- Быстров С. В., Григорьев В. В., Рабыш Е. Ю., Мансурова О. К.** Анализ качества переходных процессов в непрерывных и дискретных системах на основе условий качественной экспоненциальной устойчивости. № 9.
- Быстров Л. Г., Сафронов В. В.** Новые компьютерные алгоритмы вычисления матричной экспоненты в приложении к исследованию линейных динамических систем автоматического управления. № 8.
- Воевода А. А., Жмудь В. А., Заворин А. Н., Ядрышников О. Д.** Сравнительный анализ методов оптимизации регуляторов с использованием программных средств VisSim и MATLAB. № 9.
- Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А.** Синтез автономных и связанных многомерных систем управления. № 1.

- Данилушкин И. А., Гусева М. А.** Численно-аналитическое моделирование систем с распределенными параметрами. № 8.
- Ефанов В. Н., Муфаззалов Д. Ф.** Стабилизация нелинейной системы управления в заданной области пространства состояний. № 8.
- Ким Д. П.** Алгебраический метод синтеза систем управления с чистым запаздыванием. № 10.
- Колосов О. С., Кошоева Б. Б.** Алгоритмы численного дифференцирования реального времени в задачах управления. № 2.
- Колосов О. С., Кошоева Б. Б.** Методика реализации алгоритмов численного дифференцирования в законе регулирования с увеличенным шагом дискретизации. № 8.
- Кравченко П. П.** Синтез алгоритмов управления перевернутым маятником на тележке с использованием аппарата дельта-преобразований второго порядка. № 5.
- Краснодубец Л. А., Крамарь В. А.** Проектирование адаптивных регуляторов для мехатронных систем. № 1.
- Краснощеченко В. И.** Синтез регулятора с ограниченным управлением для неустойчивого объекта с определением границы области стабилизации на основе гомотопии векторных полей. № 9.
- Матвеев М. Г., Семенов М. Е., Шевлякова Д. В., Канищева О. И.** Зоны устойчивости и периодические режимы решения перевернутого маятника с гистерезисным управлением. № 11.
- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Энергетически оптимальное управление в линейных многоточечных задачах о встрече движений. № 3.
- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Совместное вариационное оценивание параметров состояния нелинейных динамических систем и параметров моделей измерений по критерию максимального правдоподобия. № 4.
- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Определение характеристик точности вариационных оценок параметров состояния нелинейных динамических систем. № 5.
- Мышляев Ю. И., Мишаков В. В.** Управление лагранжевыми каскадными объектами на основе настраиваемых скользящих режимов высшего порядка. № 7.
- Некрасов И. В.** Многошаговая оптимизация дискретного процесса управления методом ограниченного перебора возможных состояний системы. № 10.
- Никонов А. Н., Терехов В. А.** О проблеме начальных условий в управляемых системах с нелинейной динамикой и особенностями канала управления. № 2.

Тягунов О. А. Развитие технологий прямых корневых методов в задачах исследования систем управления. № 11.

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Аналитический синтез систем координирующего управления. № 7.

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод динамической коррекции и автономизация каналов управления в многосвязных системах на основе формализма линейно-квадратичной оптимизации. № 12.

Цыкунов А. М., Паршева Е. А. Компенсация возмущений и помех в многосвязных системах с измеряемым вектором состояния. № 6.

Чебурахин И. Ф. Математические модели для минимизации и автоматизации синтеза дискретных управляющих систем. № 4.

Чебурахин И. Ф. Алгоритмизация представления булевых функций формулами и схемами минимальной сложности в базисе Жегалкина. № 12.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Бузников С. Е., Тамбулатов П. В. Анализ решений задачи стабилизации скорости автомобиля. № 2.

Гиндин П. Д., Кондратенко В. С., Сорокин А. В., Хлызов В. А. Программа управления для промышленных установок лазерного управляемого термораскалывания. № 3.

Григорьев А. М., Иванко Е. Е., Князев С. Т., Ченцов А. Г. Динамическое программирование в обобщенной задаче курьера, осложненной внутренними работами. № 7.

Гришина Т. Г. Вероятностное обоснование и принятие решений при управлении автоматизированным производством. № 1.

Иващенко В. А., Колоколов М. В., Васильев Д. А. Концепция синтеза структуры системы автоматизированного управления электропотреблением промышленных предприятий. № 10.

Кузовлев Д. И., Тизик А. П., Тресков Ю. П. Декомпозиционный алгоритм для решения транспортной задачи с ограниченными пропускными способностями. № 1.

Оруджов Г. Г., Алиева А. А., Расулова Н. В. Система автоматического управления объемом воды в водохранилище с применением элементов ГИС-технологий. № 12.

Палагута К. А., Алексеев А. А. Метод формирования области поиска для оптимизации траектории уклонения автомобиля от лобового столкновения. № 2.

Садыгов А. Б. Метод оценки риска возникновения аварий на предприятиях. № 10.

Шаршеналиев Ж. Ш., Миркин Е. Л. Синтез модифицированных алгоритмов адаптивного управления процессом роста монокристаллов кремния. № 3.

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Айвазян С. А. Анализ состояния и перспективы развития систем отображения информации и управления боевыми эргатическими комплексами. № 6.

Айвазян С. А. Алгоритмы автоматизированного визирования и сопровождения объектов (целей) с использованием информации о направлении взгляда человека-оператора. № 12.

Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 1. Модели и оценки. № 10.

Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 2. Управление. № 11.

Ву Дык Лунг, Падерно П. И., Сатторов Ф. Э. Человеческий фактор в корпоративных сетях. Часть 3. Системный администратор. № 12.

Дударенко Н. А., Сержантова (Полякова) М. В., Ушаков А. В. Представление производственной деятельности антропокомпонента — оператора непрерывной динамической моделью с интервальными параметрами. № 5.

Иванов А. С., Лапковский Р. Ю., Уков Д. А., Филимонок Л. Ю. Причинно-следственный подход к расследованию аварийных ситуаций в человеко-машинных системах. № 2.

Максименко А. С., Федун Б. Е., Чучвага Р. В. Компьютерная система "Динамический граф" для оценки реализуемости алгоритмов деятельности оператора. № 10.

Обознов А. А., Волков Э. В., Чернецкая Е. Д. Образно-концептуальные модели в деятельности операторов сложных эргатических систем. № 5.

Падерно П. И., Павлухин И. С., Смирнов А. В. Развитие функционально-структурной теории для оценки качества деятельности операторов эргатических систем. № 5.

Петухов И. В. Исследование сенсорно-моторного взаимодействия человека-оператора и технической системы. № 2.

Сергеев С. Ф. Адаптивная автоматизация деятельности оператора в среде иммерсивного интерфейса мехатронного подвижного объекта. № 5.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

- Кабак И. С., Гаделев А. М.** Система диагностики технологического процесса резания с использованием аппарата нейронных сетей. № 10.
- Косинский М. Ю., Шихин В. А.** Разработка нейронечеткой модели для задач анализа эксплуатационной надежности автоматизированных систем. № 6.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Диане С. А.** Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения. № 2.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем. № 3.
- Машенко А. А., Мусатов В. Ю., Сысоев В. В.** ПЛИС-реализация нейросетевого алгоритма идентификации газа по векторному отклику хеморезистивной мультисенсорной микросхемы. № 10.
- Осипов В. Ю.** Стирание устаревшей информации в ассоциативных интеллектуальных системах. № 3.
- Титов В. С., Бобырь М. В., Анциферов А. В.** Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики. № 6.
- Тюрин И. Ю., Вылегжанин А. С., Кольбова Э. В., Скобелев П. О., Шепилов Я. Ю.** Опыт разработки и внедрения мультиагентной системы оперативного управления инструментальным цехом ОАО "Ижевский мотозавод — Аксион-Холдинг". № 11.
- Ходашинский И. А., Горбунов И. В.** Оптимизация параметров нечетких систем на основе модифицированного алгоритма пчелиной колонии. № 10.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Брискин Е. С., Малолетов А. В., Колесов А. М., Серов В. А.** О статически устойчивой походке шагающей машины с тремя сдвоенными ортогонально-поворотными движителями. № 7.
- Волкоморов С. В., Карпенко А. П.** Оптимизация геометрии многосекционного манипулятора типа "хобот". № 3.
- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Биомехатроника в медицинской робототехнике. № 12.

- Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н.** Применение разгрузочных элементов в конструкции робота-экзоскелета. № 11.
- Гришин А. А., Герасименко Ю. П., Мошонкина Т. Р., Павловский В. Е., Платонов А. К., Сербенюк Н. С.** Биомехатроника и лечебно-исследовательские тренажеры. Концептуальные и медико-биологические основы. № 12.
- Егоров О. Д., Коробов Е. В.** Проектирование мехатронного модуля реечного типа захватного устройства робота. № 6.
- Капустин С. Г., Дьяченко А. А.** Распределенная информационно-управляющая система автоматизированного мультиробототехнического транспортно-складского комплекса. № 7.
- Красильникъянц Е. В., Варков А. А., Тютиков В. В.** Программное обеспечение системы управления IntNCR манипуляционным роботом. № 3.
- Крутиков С. Л.** Способ получения уравнений движения роботов-манипуляторов в терминах базовых инерционных параметров. № 4.
- Лопатин П. К.** Алгоритм исследования достижимости объекта манипулятором в неизвестной среде. № 9.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И.** Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах. № 5.
- Малолетов А. В., Брискин Е. С., Колесов А. М.** О походках реконфигурируемой модульной шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями. № 5.
- Павловский В. Е., Панченко А. В.** Модели и алгоритмы управления движением малого шестиногого робота. № 11.
- Татмышевский К. В., Павлов Д. Д.** Механолюминесцентные сенсоры для тактильного осязания роботов. № 3.
- Тачков А. А.** Применение метода пропорционального наведения для управления мобильным разведывательным роботом в условиях пожара. № 7.
- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Коноплин А. Ю.** Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям. № 6.
- Царегородцева Т. А., Челноков Ю. Н.** Применение бикватернионов для решения прямой задачи кинематики роботов-манипуляторов. № 9.
- Чикуров Н. Г., Гончаров А. В.** Построение кинематической модели пятизвенного робота с использованием метода электроаналогий. № 4.

МЕХАТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Брискин Е. С., Малолетов А. В., Лихобабин Д. О.** Об управлении режимом работы скважинной штанговой насосной установки. № 1.
- Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н., Капелюховский А. А.** Система управления интенсивностью излучения скважинного гидродинамического генератора. № 1.
- Иванов В. М.** Идентификация параметров и алгоритмы самонастройки в системах стабилизации усилия резания. № 5.
- Коростелев В. Ф.** Развитие металлообрабатывающей промышленности в Италии и в России. № 1.
- Кушнир А. П.** Исследование динамических процессов в уплотнительных устройствах мехатронных шпиндельных узлов. № 5.
- Лысов В. Е., Хоренко М. В.** Система автоматического управления мехатронным модулем прецизионного поворотного стола. № 7.
- Мартинов Г. М., Нежметдинов Р. А., Соколов С. В.** Способ построения инструментария систем мониторинга и настройки параметров мехатронного технологического оборудования на основе специализированных программных средств. № 7.
- Певзнер Л. Д., Бабаков С. Е.** Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления. № 8.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

- Артеменко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дорошенко М. С., Коновалов А. С., Кучмин А. Ю., Тарасова И. Л.** Особенности выбора электроприводов зеркальной системы космических радиотелескопов. № 1.
- Ганнелъ Л. В.** Идентификация многомассового электропривода с упругими связями с помощью встроенных газочастотных анализаторов. № 6.
- Герман-Галкин С. Г., Ляпин А. С.** Анализ и модельное исследование асинхронного электропривода со скользящим управлением потокосцеплением и моментом. № 4.
- Гулуев Г. А., Пашаев А. Б., Пашаев Ф. Г., Рзаев Ас. Г., Сабзиев Э. Н.** Алгоритм определения усилия на шток по потребляемой мощности электропривода во время работы станка качалки. № 11.
- Кузовкин В. А., Филатов В. В., Чумаева М. В.** Моделирование процессов управления бесконтактным двигателем постоянного тока. № 11.
- Мозжечков В. А., Савин А. С.** Математическая модель электропривода трубопроводной арматуры

с червячным механизмом измерения крутящего момента. № 1.

- Моржов А. В., Моржова С. В.** Синтез релейного автоколебательного объемного силового гидропривода при задании ограничений на чувствительность. № 6.
- Пьявченко Т. А., Моисеева Е. В.** Параметрическая коррекция динамики электропривода на основе метода технического оптимума. № 4.
- Шароватов В. Т., Лощицкий П. А.** Математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра двустороннего действия. № 4.
- Шароватов В. Т., Лошинский П. А.** Математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия с возвратной пружиной. № 11.

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Алиев Т. А., Алиев Э. Р., Ализаде Т. А.** Технологии помехомониторинга скрытого периода изменения сейсмостойкости морских сооружений. № 12.
- Боровик С. Ю., Скобелев О. П.** Методические погрешности систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. № 4.
- Коршаковский С. И., Красненков М. А.** Увеличение эффективности инструментальных средств неразрушающего контроля энергоемких технических объектов для управления средствами аварийной защиты. № 4.
- Лобусов Е. С.** Использование средств инерциальной навигации для определения пространственного углового положения цилиндрических тел. № 8.
- Мелентьев В. С., Батищев В. И., Смолина А. М.** Метод измерения параметров емкостных датчиков положения и перемещения. № 8.
- Якунин А. Н.** Использование оператора кватерниона для определения относительной угловой ориентации квазистационарного объекта. № 8.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Гагарин Ю. А.** Методы повышения отказоустойчивости элементов памяти вычислительных и управляющих систем. № 11.
- Мельник Э. В., Горелова Г. В.** Эффект выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных распределенных информационно-управляющих системах. № 11.

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ КАФЕДРЫ
"ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ" ТУЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
В ОБЛАСТИ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

- Матвеев В. В., Шведов А. П., Серегин С. И.** Алгоритм ориентации для вращающегося по крену летательного аппарата. № 9.
- Распопов В. Я.** Научно-образовательная и научно-техническая деятельность кафедры "Приборы управления" Тульского государственного университета. № 9.
- Распопов В. Я., Машнин М. Н., Ладонкин А. В.** Управление малоразмерными беспилотными летательными аппаратами в режиме терминальной навигации. № 9.
- Распопов В. Я., Машнин М. Н., Ладонкин А. В., Шведов А. П.** Метод коррекции бесплатформенной системы ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата. № 9.

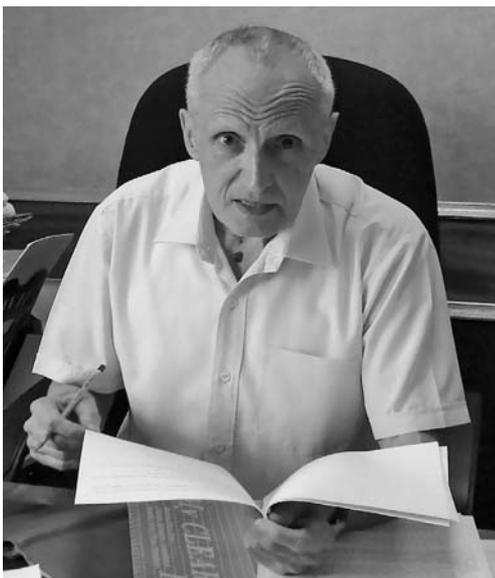
Журнал в журнале

**"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА
В АВИАКОСМИЧЕСКИХ
И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"**

- Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.** Комплексование измерений для идентификации траектории полета летательного аппарата. № 2.
- Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Динамические температурные погрешности в каналах термодатчиков семейств градуировочных характеристик системы измерения с кластерами одновитковых вихретоковых датчиков. № 12.
- Быстров Л. Г., Попов А. А., Тетерин Д. П.** Методика оценки работоспособности элементов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях произвольных входных возмущающих воздействий. № 12.
- Ваулин Ю. В., Дубровин Ф. С., Кушнерик А. А., Туфанов И. Е., Щербатюк А. Ф.** Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций. № 6.
- Гайдук А. Р.** Управление группой беспилотных летательных аппаратов с ограничением на управление и переменные состояния. № 7.
- Грязин Д. Г., Чекмарев А. Б.** Исследование кинематической схемы стенда для воспроизведения угловых колебаний. № 9.

- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Модель векторной гравиметрии на базе модели интеграции двухкомпонентной инерциальной, спутниковой и астронавигационной систем. № 8.
- Денисов М. М., Кузин М. Н., Пасисниченко М. А.** Математическое моделирование лазерной локации космических аппаратов в неинерциальной системе отсчета. № 2.
- Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В.** Гироскопический тренажер с переменным кинетическим моментом: автоматизированный анализ и управление. № 9.
- Дорожкин В. М.** Идентификация опасного развития бортовой качки судна в условиях ветроволнового воздействия. № 1.
- Евгенов А. В., Котицын Л. О., Ползик В. П., Сильвестров М. М., Бегичев Ю. И., Михайленко О. А.** Архитектура и алгоритмы бортовой системы визуализации и улучшения визуального представления внешней обстановки на информационно-управляющем поле кабины магистрального самолета. № 6.
- Евдокимчик Е. А., Оболенский Ю. Г., Синевич Г. М.** Определение крутизны радиосигнала при автоматическом заходе на посадку летательного аппарата. № 9.
- Игнатьев С. В., Степанов А. П., Завьялов П. П., Винокуров И. Ю.** Синтез алгоритма управления модуляционным вращением измерительного блока инерциально-спутниковой системы. № 3.
- Инсаров В. В., Ким В. Я., Тихонова С. В.** Методы оценки качества статических изображений, полученных при дистанционном зондировании сложноструктурированных наземных сцен. № 8.
- Кабанов Д. С.** Оптимизация пространственного маневра автоматического подводного аппарата с коррекцией параметров структуры управления. № 9.
- Канушкин С. В., Лебедев Г. Н., Чан Ван Туен, Швыдченко К. И.** Подготовка операторов безотказного управления сложными подвижными объектами при регулируемом регламенте проведения проверок. № 3.
- Кулифеев Ю. Б., Афанасьев Ю. Н.** Алгоритмизация автоматической посадки самолета в условиях метеоминимума. № 11.
- Лебедев Г. Н., Ефимов А. А., Мирзоян Л. А.** Метод маршрутизации облета неподвижных пунктов при мониторинге наземной на основе динамического программирования. № 1.
- Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Хухулин Г. Ф., Малыгин В. Б.** Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов. № 12.

- Логинов М. Ю., Челноков Ю. Н.** Аналитическое решение линейных дифференциальных уравнений ошибок БИНС для случая неподвижного объекта. № 10.
- Мироненко А. А.** Программирование траектории и режимов движения судна в стесненных водах. № 3.
- Раткин Л. С.** Сравнительный анализ беспилотных летательных аппаратов самолетного типа, применяемых для решения задач автоматизированного промышленного и экологического мониторинга состояния объектов. № 7.
- Сапунков Я. Г., Молоденков А. В.** Решение модифицированной задачи оптимального разворота космического аппарата. № 11.
- Севрюк А. Н.** Метод оптимизации кластерного анализа для решения задач локализации подводных объектов. № 3.
- Семенов И. В., Аксененко В. Д.** Компенсация влияния момента сухого трения на точность системы гироскопической стабилизации. № 2.
- Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е.** Проблемы автономного согласованного межспутникового взаимодействия в гетерогенных мультиагентных системах малоразмерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. № 4.
- Старовойтов Е. И.** Устройство контроля ориентации пассивных космических аппаратов на основе дифракционных решеток. № 4.
- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.** Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана. № 8.
- Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.** Метод идентификации параметров математической модели подводного аппарата. № 10.
- Шибанов Г. П.** Оптимизация систем управления летательным аппаратом по критериям управляемости и наблюдаемости. № 4.
- Яскевич А. В.** Математическая модель периферийного стыковочного механизма. Часть 1. Уравнения движения дифференциальных механизмов. № 7.



Поздравляем юбиляра!

Признанному корифею книгоиздания,
директору издательства "Новые технологии",
члену редколлегии журнала
"Мехатроника, автоматизация, управление"

Борису Игоревичу АНТОНОВУ

исполнилось 75 лет.

За плечами Б. И. Антонова большая жизненная школа, связанная с издательским делом: от редактора издательства "Недра" до члена Главной редакции научно-технической литературы Госкомиздата СССР, главного редактора литературы по машиностроению и горному делу, главного редактора и первого заместителя директора издательства "Машиностроение".

За годы своей издательской деятельности Борис Игоревич проявил себя как блестящий редактор, креативный организатор, высококвалифицированный специалист, чуткий, отзывчивый и обаятельный человек. Он снискал широкую известность благодаря своему таланту и трудоспособности, инициативности и настойчивости.

Борис Игоревич Антонов является организатором издательства "Новые технологии" — одного из ведущих отечественных издательств в области приоритетных направлений науки и технологий. Он внес неоценимый вклад в становление и развитие целого ряда научно-технических журналов, входящих в перечень ВАК РФ, включая журнал "Мехатроника, автоматизация, управление".

Сердечно поздравляем юбиляра, желаем ему крепкого здоровья, благополучия, неиссякаемой энергии, оптимизма и успешного претворения в жизнь планов по дальнейшему развитию нашего любимого издательства.

Редколлегия и редакция журнала.

CONTENTS

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Method of Dynamic Correction and Autonomization of Control Channels in Multiply Connected Systems on the Basis of Formalism of Linearly-Square Optimization 2

The approximate method of dynamic correction of linear multi-channel controlled objects is suggested. The desired result of the correction is represented as standard dynamic model. The applied mathematical device is based on formalism of LS-optimization. The problem of dynamic decoupling of control channels is solved.

Keywords: dynamic correction of multi-channel objects, approximation, standard dynamic model, formalism of linearly-square optimization, dynamic decoupling of control channels

Cheburakhin I. F. Algoritmizatsiya Presentations Boolean Function Formula and Circuit Minimum Difficulty in Base Zhegalkina 7

They are offered methods of the syntheses boolean formula in base Zhegalkina and reception herewith efficient estimation to difficulties (list base function). Is it Also offered original categorization ensemble boolean function, allowing remove some counting their classes on base of the functional equations and count the power of these classes. At the methods allow to conduct the efficient syntheses of the circuit from functional element.

Keywords: the boolean function and their categorization, base Zhegalkina, measures to difficulties, minimization, decomposition, syntheses, functional equations, circuit

Aliev T. A., Aliyev E. R., Alizada T. A. Technologies of Noise Monitoring of the Hidden Period of Change in Seismic Stability of Offshore Structures 15

In control systems using conventional technologies of signal analysis, results of monitoring of change in seismic stability of offshore structures are determined when they have taken express form. The offered technologies will allow detecting those changes in their initial hidden period. It will thereby be possible to organize timely preventive measures to stop further serious deformations in most vulnerable units of a structure, which will allow reducing the general volume of repair works, expenses and unexpected destructions considerably.

Keywords: technology, monitoring, seismic stability, offshore stationary platform, pier, noisy signal, correlation function, noise variance, matrix, identification

Orujov G. H., Aliyeva A. A., Rasulova N. V. System Engineering of Automatic Control in Volume of Water in a Water Basin with Application of Elements of Gis-Technologies 22

Some design issues of the automatic control of water volume through alternative sensor information on the amount of water in the reservoir are discusses. Alternative sensor information on the amount of water in the reservoirs are meters depth and surface area of the reservoir. The depth and surface area of the reservoir if the reservoir bottom topography maps allow us to determine the amount of water in the pond. Examples of calculating the volume of water in the reservoir, depending on the depth and surface area of the reservoir.

Keywords: reservoir, water resources management, the system automatically manage the amount of water, the desired amount of water

Aivazian S. A. The Algorithm of the Automatic Systems of Sight and Accompaniment of Objects (Targets) Using Information about the Direction of the Gaze of the Human Operator 27

In the article the algorithm quasioptimal estimation of the parameters of motion of objects (targets) in the light of information about the direction of the gaze of the human operator. Given the results of experimental ergonomic research systems of sight with the use of information about the direction of the gaze of the human operator.

Keywords: system of automated sighting and the support of sites, the line of sight, the module of the estimation of the parameters of motion of goals, sub-optimal estimation of the parameters of motion of objectives, visually active control, seminatural modeling complex

Vu Dyc Lung, Paderno P. I., Sattorov F. E. Man in Corporate Networks. Part 3. System Administrator 32

There is described the activity of system administrator (SA) in corporate network (CN): groups and categories of solving tasks and organization of functionality of group of SA. The analysis of the ability of evaluation of SA accordance to corporate network's specific and requirements. Workout the treatment and formed complex of criteria which allows formalizing the quality evaluation of SA activity based on available source data.

Keywords: corporate network, system administrator, tasks, evaluation criteria

Grishin A. A., Gerasimenko Yu. P., Moshonkina T. R., Pavlovsky V. E., Platonov A. K., Serbenyuk N. S. Biomechatronics and Medical-Investigation Training Units: Conceptual and Bio-Medicinal Basics 37

Innovative designs of several biomechatronic human legs stimulators for persons with disabled motion abilities are considered. The studies are carried out in RAS projects and in RAS-BAS collaboration for development of new technologies of biological and medical techniques and investigation.

Keywords: *biomechatronics, medical-investigation training units, biomechanics and physiology of human movements*

Golovin V. F., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V. Biomechatronics in Medical Robotics 45

In the article the new concept direction of biomechatronics is considered. As examples of objects the medical robots with the components of biomechatronics — mechatronics, electronics, computers, biomedicine — are offered. The examples of medical robots are given — Lokomat, Da Vinci, Cyberknife, MSIU, Paul. The feature of these robots is presence of active components — physician, robot, patient. The problems of training for development and maintenance of robots are considered.

Keywords: *biomechatronics, biotechnical system, robotics, mechanotherapy, restorative medicine, capillary massager, linear stepper drive*

Lebedev G. N., Tin Phone Kyaw, Zaw Min Htike, Khakhulin G. F., Malygin V. B. Optimal Control and Security Control of the Transverse Motion of River Vessels and Aircrafts at the Intersection of Routes 50

The problem of monitoring the safety of vehicles at the intersection of routes. Algorithms to select different speeds of the longitudinal motion and lateral motion control, increasing the minimum distance when approaching vehicles.

Keywords: *safety control, optimal control, aircraft, dynamic programming, function of risk*

Bistrov L. G., Popov A. A., Teterin D. P. The Performance Evaluation Methodology of Aircraft Management Board Elements in Arbitrary input Disturbances 56

The performance evaluation methodology of aircraft management board elements in near-real time is presented here, including the original approaches for solving the problem of current passive parametric identification and simulating of the system elements dynamic characteristics with using of special-purpose computers

Keywords: *aircrafts, efficiency, identification, simulating, high accuracy*

Borovik S. Yu., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. Dynamic Temperature Errors in Thermocorrection Channels of Calibration Characteristics Sets of the Measuring System with Clusters of Single-Coil Eddy-Current Sensors 62

The heat model of a single-coil eddy-current sensor with sensitive element (SE) as a conductor length and build-in thermocouple is considered. The thermocouple signals decodes in a special system channel and after its processing are used in algorithms of calibration characteristics sets thermocorrection of systems for measuring of blade tips displacements coordinates in compressors or turbines of gas-turbine engines (GTE). The model makes it possible to determine a temperature of thermocouple hot end (ThHE) under a variation of air-gas temperature in SE placing area in GTE transient regime. It also enables to determine the dynamic temperature error as a SE and ThHE temperature difference and to obtain it quantitative assessments for air-gas temperature variation. The method for measuring and calculating of environment (sensitive element) temperature is given too. This method make it possible to use an existing in the system algorithm for thermocorrection under the transient conditions in GTE when the environment (sensitive element) temperature is changes with time.

Keywords: *single-coil eddy-current sensor, build-in thermocouple, dynamic temperature error, algorithm of thermocorrection, method for measuring and calculating of sensitive element temperature*

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 *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 28.09.2012. Подписано в печать 12.11.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1212. 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"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.