

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 5 (98)

май

2009

Редакционный совет:

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

Главный редактор:
ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Выпускающий редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:
ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Погорелов В. А., Клодина Т. В.** Синтез алгоритмов нелинейной фильтрации на основе использования информационных критериев 2
- Аюкасов Р. А.** Синтез алгоритма оптимального управления стохастическими динамическими системами с запаздыванием. 8
- Сафронов В. В., Быстров Л. Г.** Построение и ранжирование полного множества матриц, сопровождающих характеристический полином, в задачах моделирования, анализа и синтеза САУ 11
- Дударенко Н. А., Полякова М. В., Ушаков А. В.** Достаточные алгебраические условия обобщенной синхронизируемости многоканальных динамических объектов 17

ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В.** Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 2. Реализуемость методов 21
- Дунин-Барковский И. И.** Мехатронные системы для высокоточного трехмерного контроля размеров на основе активных систем технического зрения в современных технологиях. 31

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

- Алексеев К. Б., Малявин А. А., Палагута К. А.** Сравнительный анализ предикторного и нечеткого управления движением автомобиля. 36
- Девятисильный А. С., Дорожко В. М.** Управление безопасным движением автомобилей в транспортном потоке. 46
- Ляхов С. В., Белоус М. М.** Комплекс для исследования систем активной безопасности автомобиля 53

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Морозов В. В., Жданов А. В., Беляев Л. В.** Разработка мехатронного модуля имплантируемой системы искусственного сердца и его лабораторно-стендовые испытания. 58
- Бушманов А. В., Дрюков А. А.** Имитационное моделирование процессов компрессии и distraction отломков костей аппаратом остеосинтеза 62
- Матвеев И. А.** Алгоритм поиска радужки глаза по взаимосвязанным максимумам проекций градиентов яркости 68
- Бураков В. В.** Модели и алгоритмы управления качеством программных средств на примере приложения для военной телемедицины 71

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА В ОБРАЗОВАНИИ

- Кобрин А. И., Мартыненко Ю. Г., Письменная Е. В.** Всероссийский научно-технический фестиваль молодежи "Мобильные роботы" имени проф. Е. А. Девянина . . . 76
- Contents** 79

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание 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

В. А. Погорелов, канд. техн. наук, доц., докторант,
Ростовский военный институт ракетных войск,

Т. В. Клодина, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Ростовский государственный
университет путей сообщения
locman@ctsnet.ru

Синтез алгоритмов нелинейной фильтрации на основе использования информационных критериев

Исследуются различные аспекты применения информационных критериев для синтеза уравнений оценивания, полученных на основе решения модифицированного уравнения Стратоновича. Приводятся результаты моделирования, иллюстрирующие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: теория информации, апостериорная плотность вероятности, гауссовская аппроксимация

Введение

При решении задач оценивания, идентификации и управления сложными динамическими системами [1—6], возникает необходимость использования интегро-дифференциального уравнения с частными производными Стратоновича [7]. Результаты его решения составляют основу современной теории нелинейной фильтрации [3]. Однако в настоящее время все больше используется не само уравнение Стратоновича, а его различные модификации [3—6]. Последние, как правило, возникают в ходе решения задач управления распределенными системами и их параметрической и непараметрической идентификации. В настоящее время решения модифицированных уравнений Стратоновича, полученных в [3—6], предполагается осуществлять численными методами [8]. Однако использование этих методов для анализа многомерных многосвязанных систем в реальном масштабе времени практически невозможно. В то же время, сходство их структур с уравнением Стратоновича позволяет использовать хорошо апробированные на практике методы, ранее разработанные для решения последнего [9, 10]:

- кусочно-полиномиальную аппроксимацию нелинейных функций;
- метод аппроксимации решения функциональными рядами;

- конечно-разностную аппроксимацию апостериорной плотности вероятности;
- гауссовское приближение для распределения вероятностей;
- разложение нелинейных функций уравнений объекта и наблюдателя в ряд Тейлора в окрестности оценки решения или некоторого программного движения;
- замену среднего по множеству средним по времени и т. д.

Не останавливаясь детально на преимуществах и недостатках использования перечисленных методов, отметим, что на практике наибольшее распространение получила гауссовская аппроксимация [1, 2], обеспечивающая требуемый компромисс между точностью решения и объемом вычислительных затрат. Более того, при ограничении нормы матрицы ковариаций гауссовская плотность распределения *минимизирует* информационный функционал, т. е. с информационной точки зрения является наилучшей из всех плотностей. Это, в свою очередь, позволяет, формируя оценки вектора состояния, *максимизирующие* различные критерии точности, решать на основе их использования задачи стохастического управления и идентификации в *минимаксной* постановке. Целью данной работы является поиск решений интегро-дифференциальных уравнений с частными производными на основе использования гауссовской аппроксимации. Рассмотрим использование метода гауссовской аппроксимации более подробно.

Постановка задачи

Пусть стохастический объект описывается нелинейным векторным дифференциальным уравнением размерности N в симметризованной форме

$$\dot{Y} = F(Y, t) + F_0(Y, t)U + F_1(Y, t)\xi,$$

где Y — N -мерный вектор состояния системы; $F(Y, t)$ — известная нелинейная векторная функция размерности N ; $F_0(Y, t)$ и $F_1(Y, t)$ — известные нелинейные матричные функции размерности $N \times S$ и $N \times L$; ξ — L -мерный вектор белого гауссовского шума с нулевым средним и матрицей интенсивности $D_\xi(t)$; $U(Y, t)$ — S -мерный вектор искомого управления, $S \leq N$.

Наблюдение управляемого вектора Y осуществляется с помощью измерителя, описываемого в общем случае нелинейным стохастическим уравнением вида

$$Z = H(Y, t) + \zeta,$$

где Z — K -мерный вектор выходных сигналов измерителя, $K \leq N$; $H(Y, t)$ — известная нелинейная вектор-функция наблюдения размерности K ; ζ — белый гауссовский вектор-шум измерения размерности $r \leq K$ с нулевым средним и матрицей интенсивности $D_\zeta(t)$.

Как показано в [4], апостериорная плотность вероятности (АПВ) $\rho(X, U, t/Z(\tau), \tau \in [0, t]) = \rho_z$ такого процесса, удовлетворяющего приведенным выше условиям, описывается интегро-дифференциальным уравнением с частными производными вида

$$\frac{\partial \rho_z}{\partial t} = L\{q, b, \rho_z(Y, t)\} + [R - R_0]\rho_z + \frac{1}{2} \operatorname{div} \left\{ F_0(Y, t) \left[\frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \rho_z} \right) \right]^T \rho_z^2 \right\}, \quad (1)$$

где

$$L\{Q, b, \rho_z(Y, t)\} = -\operatorname{div}\{Q(Y, t)\rho_z(Y, t)\} + \frac{1}{2} \operatorname{div}[\operatorname{div}\{B(Y, t)\rho_z(Y, t)\}];$$

$$Q(Y, t) = F(Y, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial Y} F_1(Y, t) D_\zeta [F_1^T(Y, t)]^{(v)};$$

$$B(Y, t) = F_1(Y, t) D_\zeta F_1^T(Y, t);$$

$$R = R(Y, t) = -\frac{1}{2} [Z - H(Y, t)]^T D_\zeta^{-1} [Z - H(Y, t)];$$

$$R_0 = \int_{-\infty}^{\infty} R(Y, t) \rho_z(Y, t) dY;$$

div — символ операции дивергенции строки матрицы; (v) — операция преобразования прямоугольной матрицы A размерности $m \times n$ в вектор $A^{(v)}$: $A^{(v)} = (a_{11} \ a_{21} \ \dots \ a_{m1} \ a_{12} \ a_{22} \ \dots \ a_{m2} \ \dots \ a_{1n} \ a_{2n} \ \dots \ a_{mn})^T$, $a_{i,j}$ — (i, j) -й элемент матрицы A .

В качестве функционала Φ в выражении (1) наиболее часто используются информационные критерии Шеннона $\Phi = -\rho_z \ln \rho_z$, Фишера $\Phi = -\rho_z \left(\frac{\partial \ln \rho_z}{\partial y} \right)$ и Кульбака $\Phi = \rho_z \ln \frac{q_z}{\rho_z}$. Первые два критерия харак-

теризуют энтропию системы, а последний — степень отклонения искомой плотности ρ_z от заданной $g_z \forall Y \in (Y_{\min}, Y_{\max})$.

Так как конкретизация Φ определяет способ решения (1), то искать его приближенное решение необходимо для каждого из рассмотренных выше критериев. Полученные таким образом решения будут алгоритмами нелинейной фильтрации, альтернативными обобщенному фильтру Калмана [10].

Решение задачи

Для упрощения дальнейших преобразований сначала рассмотрим случай, когда состояние динамической системы описывается скалярным уравнением. Затем полученные результаты обобщим на векторный случай. Возьмем за правило обозначать скалярные переменные малыми буквами, а соответствующие им векторные — большими. Например, скалярной функции $f(y, t)$ будет соответствовать векторная функция $F(Y, t)$.

В рамках проводимого исследования считаем, что АПВ процесса y_t можно аппроксимировать с требуемой точностью гауссовской плотностью распределения $\rho_z(y, t)$:

$$\rho_z(y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(t)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(y - \hat{y}(t))^2}{D(t)} \right], \quad (2)$$

где $\hat{y}(t)$ — математическое ожидание процесса y ; $D(t)$ — дисперсия.

Приведем выражение (1) к следующему удобному для дальнейших преобразований виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} [q(y, t)\rho_z] - \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} [b(y, t)\rho_z] - [r - r_0]\rho_z = \\ = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ f_0(y, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial \rho_z} \right] \rho_z^2 \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

В полученном уравнении разложим коэффициенты сноса $q(Y, t)$, диффузии $b(y, t)$, слагаемое r и член $f_0(y, t)$ в ряд Тейлора в окрестностях математического ожидания $\hat{y}(t)$:

$$q(y, t) \approx q(\hat{y}(t)) + \dot{q}(\hat{y}(t))(y - \hat{y}(t)); \quad (4)$$

$$b(y, t) \approx b(\hat{y}(t));$$

$$r(y, t) \approx r(\hat{y}, t) + \dot{r}(\hat{y}, t)(y - \hat{y}) + \frac{1}{2} \ddot{r}(\hat{y}, t)(y - \hat{y})^2;$$

$$f_0(y, t) \approx f_0(\hat{y}, t).$$

Подставив (4) в (1), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_z}{\partial t} + \dot{q}(\hat{y}(t))\rho_z + [q(\hat{y}(t)) + \dot{q}(\hat{y}(t))(y - \hat{y}(t))] \frac{\partial \rho_z}{\partial y} - \\ & - \frac{1}{2} b(\hat{y}(t)) \frac{\partial^2 \rho_z}{\partial y^2} - [\dot{r}(\hat{y}, t)(y - \hat{y}) - \frac{1}{2} \ddot{r}(\hat{y}, t)(y - \hat{y})^2 + \\ & + \frac{1}{2} \ddot{r}(\hat{y}, t) D(t)] \rho_z = \frac{1}{2} f_0(\hat{y}, t) \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial \rho_z} \right] \rho_z^2 \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

В случае выбора перечисленных выше критериев решение уравнения (4) в рамках гауссовской аппроксимации можно свести к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений, вид которых зависит от критерия Ф. Для этого докажем следующие теоремы.

Теорема 1. Если входящий в правую часть уравнения (3) функционал Ф имеет вид $\Phi = -\rho_z \ln \rho_z$, и его решение подчиняется нормальному закону (2), то параметры аппроксимации (1) удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}(t) = q(\hat{y}(t)) + \dot{r}(\hat{y}(t))D(t); \\ \dot{D}(t) = 2\dot{q}(\hat{y}(t))D(t) + b(\hat{y}(t)) + \\ + D^2(t)\ddot{r}(\hat{y}(t)) - 2(\sqrt{2\pi D})^{-1}f_0(\hat{y}(t)), \end{cases} \quad (6)$$

если $\left(\frac{y - \hat{y}(t)}{D(t)}\right)^n$ ($n \geq 2$) — малая величина, которой можно пренебречь.

Доказательство.

В условиях теоремы 1 правая часть уравнения (4) может быть представлена с учетом (2) и (4) в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ f_0(y, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial \rho_z} \right] \rho_z^2 \right\} = \\ & = \rho_z^2(y, t) f_0(\hat{y}, t) \left[\frac{1}{D(t)} - \frac{2(y - \hat{y}(t))^2}{D^2(t)} \right]. \end{aligned}$$

Для удобства выкладок введем замену

$$K(y, t) = \frac{y - \hat{y}(t)}{D(t)},$$

полагая, что АПВ (2) может быть аппроксимирована следующим образом:

$$\rho_z(y, t) \approx (\sqrt{2\pi D}) \left[1 - \frac{1}{2} D(t) I^2(y, t) \right]. \quad (7)$$

Отметим, что согласно теореме Лейбница о сходимости знакопередающихся рядов погрешность аппроксимации АПВ (7) не будет превышать $\left(\frac{y - \hat{y}(t)}{D(t)}\right)^4$.

С учетом сделанного допущения уравнение (3) можно представить как

$$\begin{aligned} & \frac{\dot{D}(t) I^2(y, t)}{2} + \dot{\hat{y}}(t) I(y, t) - \frac{\dot{D}(t)}{2D(t)} + \dot{q}(\hat{y}(t)) - \\ & - q(\hat{y}) I(y, t) - \dot{q}(\hat{y}(t)) D(t) I^2(y, t) - \frac{b(\hat{y}(t))}{2} I^2(y, t) + \\ & + \frac{b(\hat{y}(t))}{2D(t)} - \dot{r}(\hat{y}, t) D(t) I(y, t) - \frac{1}{2} \ddot{r}(\hat{y}, t) D^2(t) I^2(y, t) + \\ & + \frac{1}{2} D(t) \ddot{r}(\hat{y}, t) = (2\sqrt{2\pi D})^{-1} f_0(\hat{y}, t) \times \\ & \times \left[\frac{1}{D(t)} - 2I^2(y, t) \right] \left[1 - \frac{1}{2} D(t) I^2(y, t) \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Используя условия равенства многочленов в (8), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида (6).

Таким образом, теорема доказана.

Для удобства практического использования системы (6) подставим в нее выражения для коэффициентов сноса $q(\hat{y}(t))$ и диффузии $b(\hat{y}(t))$, приведенные в (1). В результате имеем

$$\dot{\hat{y}} = f(\hat{y}, t) + D(t) \frac{2}{D_\xi} \frac{\partial h(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} [z(t) - h(\hat{y}, t)]; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{D} &= 2 \frac{\partial f(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} D(t) + f_1^2(\hat{y}, t) \frac{D_\xi}{2} - \\ &- D^2(t) \frac{2}{D_\xi} \left(\frac{\partial h(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} \right)^2 - 2(\sqrt{2\pi D(t)})^{-1} f_0(\hat{y}, t). \end{aligned}$$

Система уравнений (9) допускает обобщение полученных результатов на векторный случай. Воспользовавшись соотношениями, приведенными в приложении, получим

$$\dot{\hat{Y}} = F(\hat{Y}, t) + K(t) \frac{2}{D_\xi} \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} [Z(t) - H(\hat{Y}, t)]; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{K} &= \frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} K(t) + K(t) \left(\frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^T + \\ &+ \frac{1}{2} F_1(\hat{Y}, t) D_\xi F_1^T(\hat{Y}, t) - \\ &- K(t) \left(\frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^T \frac{2}{D_\xi} \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} K(t) - \\ &- 2 \left(\sqrt{(2\pi)^n \det K} \right)^{-1} F_0(\hat{Y}, t). \end{aligned}$$

Уравнения (10) отличаются от уравнений обобщенного фильтра Калмана [10] последним членом в уравнении матрицы ковариаций, который обусловлен решением на этапе синтеза (1) задачи управления движением динамической системы.

Как уже было отмечено, способ приближенного решения (1) зависит от выбора критерия Ф. В связи

с этим получим уравнения оценивания, выбрав в качестве критерия Ф критерий Фишера, альтернативный рассмотренному выше критерию Шеннона.

Для этого докажем следующую теорему.

Теорема 2. Если входящий в правую часть уравнения (3) функционал Ф имеет вид $\Phi = -\rho_z \left(\frac{\partial \ln \rho_z}{\partial y} \right)$, и его решение подчиняется нормальному закону (2), то параметры аппроксимации (1) удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}(t) = q(\hat{y}(t)) + \dot{r}(\hat{y}(t))D(t); \\ \dot{D}(t) = 2\dot{q}(\hat{y}(t))D(t) + b(\hat{y}(t)) + \\ + D^2(t)\ddot{r}(\hat{y}(t)) + 2\frac{(\sqrt{2\pi D(t)})^{-1}}{D(t)}f_0(\hat{y}(t)), \end{cases} \quad (11)$$

если $\left(\frac{y - \hat{y}(t)}{D(t)} \right)^n$ ($n \geq 2$) — малая величина, которой можно пренебречь.

Доказательство.

В условиях теоремы 2 правая часть уравнения (3) с учетом (2) и (4) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ f_0(y, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial \rho_z} \right] \rho_z^2 \right\} = \\ & = \frac{2\rho_z^2(y, t)}{D(t)} f_0(\hat{y}, t) \left[-\frac{1}{D(t)} + \frac{2(y - \hat{y}(t))^2}{D^2(t)} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Для выбранного критерия и сделанных в теореме 1 допущений представим выражение (3) следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\dot{D}(t)I^2(y, t)}{2} + I(y, t)\dot{\hat{y}}(t) - \frac{\dot{D}(t)}{2D(t)} + \dot{q}(\hat{y}(t)) - \\ & - q(\hat{y})I(t) - \dot{q}(\hat{y}(t))D(t)I^2(y, t) - \frac{b(\hat{y}(t))}{2}I^2(y, t) + \\ & + \frac{b(\hat{y}(t))}{2D(t)} - \dot{r}(\hat{y}, t)D(t)I(y, t) - \frac{1}{2}\ddot{r}(\hat{y}, t)D^2(t)I^2(y, t) + \\ & + \frac{1}{2}D(t)\ddot{r}(\hat{y}, t) = (2D(t)\sqrt{2\pi D(t)})^{-1}f_0 \left[-\frac{1}{D(t)} + \right. \\ & \left. + 2I^2(y, t) \right] \left[1 - \frac{1}{2}D(t)I^2(y, t) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Используя, как и прежде, условия равенства многочленов в (13), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида (11).

Таким образом, теорема доказана.

Система (11) с учетом (1) в скалярной форме имеет вид

$$\dot{\hat{y}} = f(\hat{y}, t) + D(t) \frac{2}{D_\zeta} \frac{\partial h(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} [z(t) - h(\hat{y}, t)]; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{D} & = 2\frac{f(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} D(t) + f_1^2(\hat{y}, t) \frac{D_\zeta}{2} - \\ & - D^2(t) \frac{2}{D_\zeta} \left(\frac{\partial h(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} \right)^2 + 2\frac{(\sqrt{2\pi D(t)})^{-1}}{D(t)} f_0(\hat{y}, t), \end{aligned}$$

а в векторной —

$$\dot{\hat{Y}} = F(\hat{Y}, t) + K(t) \frac{2}{D_\zeta} \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} [Z(t) - H(\hat{Y}, t)]; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{K} & = \frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} K(t) + K(t) \left(\frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^T + \\ & + \frac{1}{2} F_1(\hat{Y}, t) D_\zeta F_1^T(\hat{Y}, t) - \\ & - K(t) \left(\frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^T \frac{2}{D_\zeta} \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} K(t) + \\ & + 2 \left(\sqrt{(2\pi)^n \det K} \right)^{-1} K^{-1}(t) F_0(\hat{Y}, t). \end{aligned}$$

Теорема 3. Если входящий в правую часть уравнения (3) функционал Ф имеет вид $\Phi = \rho_z \ln \frac{g_z}{\rho_z}$, и его решение подчиняется нормальному закону (2), а требуемая плотность g_z имеет вид

$$g_z(y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \tilde{D}(t)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(y - \tilde{y}(t))^2}{\tilde{D}(t)} \right], \quad (16)$$

где $\tilde{y}(t)$ — требуемое значение математического ожидания процесса y_t , $\tilde{D}(t)$ — требуемое значение дисперсии, то параметры аппроксимации (1) удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}(t) = q(\hat{y}(t)) + \frac{\hat{y} - \tilde{y}}{\tilde{D}(t)\sqrt{2\pi D(t)}} + \dot{r}(\hat{y}(t)); \\ \dot{D}(t) = 2\dot{q}(\hat{y}(t))D(t) + b(\hat{y}(t)) + \\ + D^2(t)\ddot{r}(\hat{y}(t)) - \frac{f_0(\hat{y}, t)}{\sqrt{2\pi D(t)}} \left[1 - \frac{D(t)}{\tilde{D}(t)} \right]. \end{cases} \quad (17)$$

Доказательство.

В условиях теоремы 3 правая часть уравнения (3) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ f_0(y, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial \rho_z} \right] \rho_z^2 \right\} = f_0(\hat{y}, t) \rho_z^2 \left[\frac{1}{D(t)} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{\tilde{D}(t)} - \frac{2\tilde{I}^2(y, t)}{D^2(t)} + \frac{2\tilde{I}^2(y, t) + 2\tilde{I}^2(y, t)(\hat{y} - \tilde{y})}{D(t)\tilde{D}(t)} \right], \end{aligned} \quad (18)$$

где для удобства выкладок введены замены

$$\tilde{I}(y, t) = y - \tilde{y}(t), \quad (19)$$

$$\tilde{I}(y, t) = y - \tilde{y}(t).$$

Подставим выражения (2), (18), (19) в уравнение (3). В результате имеем:

$$\begin{aligned} & \frac{\dot{D}(t)}{2D^2(t)} \tilde{I}^2(y, t) + \frac{\dot{y}(t)}{D(t)} \tilde{I}(y, t) - \frac{\dot{D}(t)}{2D(t)} - \\ & - \frac{q(\hat{y})}{D(t)} \tilde{I}(y, t) + \dot{q}(\hat{y}(t)) - \frac{b(\hat{y}(t))}{2D^2(t)} \tilde{I}^2(y, t) + \frac{b(\hat{y}(t))}{2D(t)} - \\ & - \dot{r}(\hat{y}, t) \tilde{I}(y, t) - \frac{1}{2} \ddot{r}(\hat{y}, t) \tilde{I}^2(y, t) + \frac{1}{2} D(t) \ddot{r}(\hat{y}, t) = \\ & = (2\sqrt{2\pi D(t)})^{-1} f_0 \left[\frac{1}{D(t)} - \frac{1}{\tilde{D}(t)} - \frac{2\tilde{I}^2(y, t)}{D^2(t)} + \right. \\ & \left. + \frac{2\tilde{I}^2(y, t) + 2\tilde{I}^2(y, t)(\hat{y} - \tilde{y})}{D(t)\tilde{D}(t)} \right] \left[1 - \frac{\tilde{I}^2(y, t)}{2D(t)} \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

Используя условия равенства многочленов в (20), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида (17).

Таким образом, теорема доказана.

Для удобства практического использования системы (17) подставим в нее выражения для коэффициентов сноса $q(\hat{y}(t))$ и диффузии $b(\hat{y}(t))$, приведенные в (1). В результате имеем

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}} &= f(\hat{y}, t) + \frac{\hat{y} - \tilde{y}}{D(t)\sqrt{2\pi D(t)}} + \\ & + D(t) \frac{2}{D_\zeta} \frac{\partial h(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} [z(t) - h(\hat{y}, t)]; \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{D} &= 2 \frac{\partial f(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} D(t) + f_1^2(\hat{y}, t) \frac{D_\xi}{2} - \\ & - D^2(t) \frac{2}{D_\zeta} \left(\frac{\partial h(\hat{y}, t)}{\partial \hat{y}} \right)^2 - \frac{f_0(\hat{y}, t)}{\sqrt{2\pi D(t)}} \left[1 - \frac{D(t)}{\tilde{D}(t)} \right]. \end{aligned}$$

Система уравнений (21) допускает обобщение полученных результатов на векторный случай. Воспользовавшись соотношениями, приведенными в приложении, получим:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{Y}} &= F(\hat{Y}, t) + \frac{\hat{Y} - \tilde{Y}}{\tilde{D}\sqrt{2\pi \tilde{D}}} + \\ & + K \frac{2}{D_\zeta} \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} [Z(t) - H(\hat{Y}, t)]; \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K} &= \frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} K(t) + K(t) \left(\frac{\partial F(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^T + \\ & + \frac{1}{2} F_1(\hat{Y}, t) D_\xi F_1^T(\hat{Y}, t) - K(t) \left(\frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} \right)^T \times \\ & \times \frac{2}{D_\zeta} \frac{\partial H(\hat{Y}, t)}{\partial \hat{Y}} K(t) - \frac{F_0(\hat{Y}, t)}{\sqrt{(2\pi)^n \det K}} \left[1 - \frac{K(t)}{\tilde{K}(t)} \right]. \end{aligned}$$

Пример

Пусть объект, описывается уравнением

$$\dot{y} = -y^3 + y^2 u + \xi, \quad (23)$$

где ξ — белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и интенсивностью D_ξ ; u — управление, которое определяется в соответствии с методикой, разработанной в [4], а уравнение наблюдателя имеет вид

$$\dot{Z} = y + \zeta, \quad (24)$$

где Z — выходной сигнал измерителя; ζ — белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и интенсивностью D_ζ .

Требуется на основе приближенного решения (1) синтезировать алгоритм обработки входной реализации $y(t)$, описываемой уравнением (23), для случаев использования рассмотренных выше информационных критериев.

Подставим в полученные уравнения фильтрации (6), (12) и (21) уравнения (23) и (24). В результате имеем

- для критерия Шеннона:

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}} = -\hat{y}^3 + D \frac{2}{D_\zeta} [z(t) - \hat{y}]; \\ \dot{D} = -6\hat{y}^2 D(t) + \frac{D_\xi}{2} - D^2(t) \frac{2}{D_\zeta} - \\ - 2(\sqrt{2\pi D(t)})^{-1} \hat{y}^2; \end{cases} \quad (25)$$

- для критерия Фишера:

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}} = -\hat{y}^3 + D \frac{2}{D_\zeta} [z(t) - \hat{y}]; \\ \dot{D} = -6\hat{y}^2 D(t) + \frac{D_\xi}{2} - D^2(t) \frac{2}{D_\zeta} + \\ + 2 \frac{(\sqrt{2\pi D(t)})^{-1}}{D(t)} \hat{y}^2; \end{cases} \quad (26)$$

- для критерия Кульбака:

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}} = -\hat{y}^3 + \frac{\hat{y} - \tilde{y}}{\tilde{D}\sqrt{2\pi \tilde{D}}} + D \frac{2}{D_\zeta} [z - \hat{y}]; \\ \dot{D} = -6\hat{y}^2 D + \frac{D_\xi}{2} - D^2 \frac{2}{D_\zeta} - \\ - 2 \left(1 - \frac{D}{\tilde{D}} \right) (\sqrt{2\pi D(t)})^{-1} \hat{y}^2. \end{cases} \quad (27)$$

Для анализа эффективности использования уравнений фильтрации (25), (26) и (27) было проведено численное моделирование, которое осуществлялось при следующих начальных условиях: $y(0) = 0,01$; $D_\xi = 10^{-4}$; $D_\zeta = 10^{-3}$; $\tilde{y}(t) = \exp(-0,01t)$; $\tilde{D}(t) = \sin(0,1t)$. Интегрирование осуществлялось методом Рунге—Кутты четвертого порядка на ин-

тервале времени от 0 до 1000 с, с шагом 0,001. Полученные оценки сравнивали с оценками, найденными в результате решения уравнения (1) методом прямоугольных сеток на интервале $y \in [-50; 50]$, $t \in [0, 1000]$ с с равным шагом для всего интервала $\Delta y = 0,01$, $\Delta t = 0,001$. Анализ полученных результатов показывает, что ошибки оценивания в первом случае не превышали значения $3 \cdot 10^{-4}$, во втором — $2 \cdot 10^{-4}$, в третьем — $3 \cdot 10^{-5}$. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности эффективного использования предложенного подхода в реальных динамических системах.

Заключение

В статье разработаны конструктивные алгоритмы стохастической фильтрации, позволяющие на основе использования информационных критериев получить приближенное решение интегро-дифференциального уравнения с частными производными вида (1). Их использование может найти широкое применение в различного рода информационных системах, а также при решении задач управления и идентификации, когда быстродействие бортовых вычислителей оказывается недостаточным для решения (1) в реальном масштабе времени.

Список литературы

1. Пупков К. А., Неусьшин К. А. Вопросы теории и реализации систем управления и навигации. М.: Биоинформ, 1997. 364 с.
2. Степанов О. А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 369 с.
3. Хуторцев В. В., Соколов С. В., Шевчук П. С. Современные принципы управления и фильтрации в стохастических системах. М.: Радио и связь, 2001.
4. Соколов С. В., Погорелов В. А. Апостериорное управление объектом с неопределенной структурой // Автоматика и вычислительная техника. 2002. № 3. С. 3—11.
5. Погорелов В. А., Гусарин С. А. Определение параметров модели собственных уходов гиросtabilизированной платформы на основе информационных критериев // Космические исследования. 2003. № 5. Т. 41. С. 506—513.
6. Погорелов В. А. Решение задачи стохастического управления гиросtabilизированной платформой с параметрически неопределенной моделью дрейфа // Теория и системы управления. 2003. № 2. С. 152—160.
7. Стратонович Р. Л. Условные Марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М.: Изд-во МГУ, 1966. 319 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1997. 656 с.
9. Пугачев В. С., Силицын И. Н. Теория стохастических систем. М.: Логос, 2004. 1000 с.
10. Силицын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева. М.: Логос, 2006. 640 с.

ИНФОРМАЦИЯ

28 сентября—4 октября 2009 г.

в пос. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края

в рамках Международной научно-технической мультikonференции

"Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники" (ИКТМР-2009)

состоится локальная научно-техническая конференция

"ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА. НАНО-, МИКРО- И МАКРОРОБОТЫ" (ЭР-2009)

Председатель — профессор Е. И. Юевич

Направления конференции

- ◆ Научно-технические проблемы экстремальной робототехники.
- ◆ Теория и методы проектирования робототехнических систем.
- ◆ Нано- и микротехнологии в робототехнике.
- ◆ Компоненты систем экстремальной робототехники.
- ◆ Опыт применения систем экстремальной робототехники.

Подробную информацию о мультikonференции ИКТМР-2009 и локальной конференции ЭР-2009 см. на сайте <http://www.mvs.tsure.ru>

Р. А. Аюкасов, соискатель,
Казанский государственный технический
университет им. А. Н. Туполева
Rustam.Aukasov@tatar.ru

Синтез алгоритма оптимального управления стохастическими динамическими системами с запаздыванием

Описывается применение метода последовательных приближений к оптимальному управлению нелинейными стохастическими системами в запаздывании.

Ключевые слова: оптимальное управление, стохастическая система с запаздыванием, стохастические дифференциально-разностные уравнения, численные методы.

Введение. Рассмотрим задачу управления нелинейными стохастическими системами с запаздыванием.

С использованием расширения фазового пространства [1, 2, 4] исходный процесс, описываемый системой стохастических дифференциальных уравнений с запаздыванием, сводится к диффузионному марковскому процессу [1, 2, 4].

Данный подход позволяет представить исходную стохастическую задачу в виде последовательности детерминированных задач с распределенными параметрами относительно компонент вектора состояний плотности распределения при наличии дифференциальной связи, описываемой параболическим уравнением Колмогорова—Фоккера—Планка (КФП) [3].

Для систем без запаздывания с аддитивными возмущениями без ограничений принцип максимума, сформулированный на основе уравнений КФП, был использован впервые в работе [6]. В [7] предложен численный метод определения оптимального управления систем с обратной связью при выполнении граничных условий на правом конце траектории, сводящийся к решению нелинейного параболического уравнения.

В данной статье предлагается численный метод решения задач оптимизации управления систем, поведение которых описывается системой стохастических дифференциальных уравнений с запаздыванием, а эффективность управления оценивается минимумом терминального функционала.

Постановка задачи. Требуется определить оптимальное управление u , доставляющее минимум терминальному функционалу

$$I_0(u) = \int_{\Omega} \Phi_0(x) p(t_k, x) dx, \quad (1)$$

характеризующему эффективность функционирования системы, поведение которой на отрезке времени $[t_0, t_k]$ описывается нелинейными стохастическими дифференциальными уравнениями с запаздыванием

$$dX_i = \varphi_i(t, X(t), X(t - \tau), u) dt + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}(t, X(t)) d\eta_j(t), \quad (2)$$

$$X(t) = \phi(t), \quad t \in [t_0 - \tau, t_0],$$

где t — время; t_0, t_k — начальная и конечная точки рассматриваемого интервала времени $[t_0, t_k]$; τ — постоянное запаздывание; $X(t)$ — n -мерная вектор-функция состояния фазовых координат системы, каждая компонента которой определена на отрезке времени $[t_0 - \tau, t_0]$ функцией $\phi_i(t)$, $i = \overline{1, n}$; $d\eta_j(t)$ — стохастические дифференциалы Стратоновича винеровских процессов $\eta_j(t)$ с интенсивностями G_j^n ; $u(t)$ — кусочно-непрерывная детерминированная r -мерная вектор-функция управления.

Метод сведения исходной стохастической задачи оптимизации к эквивалентной последовательности детерминированных задач. Как известно [2], процесс, описываемый уравнениями (2), в общем случае не является марковским и к нему не применим аппарат КФП-уравнений.

Расширение фазового пространства [1, 4] позволит исключить из системы (2) запаздывание и свести систему к марковскому процессу.

Введем на отрезке времени $[t_0, t_k]$ сетку с шагом τ и узлами $t_q = t_0 + q\tau$, $q = 1, \dots, N$, где q — номер интервала $[t_{q-1}, t_q]$, а N — число интервалов, $t_k = t_0 + N\tau$. Точки t_q представляют собой правильные точки в смысле [8].

Введем на интервале времени $[t_{q-1}, t_q]$ расширенный вектор состояний $X_q(s) = (X^1(s), X^2(s), \dots, X^q(s))$ с компонентами фазовых состояний системы по последовательно примыкающим интервалам, где $s \in [0, \tau]$, $X^q(s) = (X_1(t_{q-1} + s), X_2(t_{q-1} + s), \dots, X_n(t_{q-1} + s))$ (здесь верхние индексы обозначают номер интервала).

Обозначим управление на интервале $[t_{q-1}, t_q]$ вектор-функцией $u^q(s) = (u_1(t_{q-1} + s), u_2(t_{q-1} + s), \dots, u_r(t_{q-1} + s))$, а аддитивные возмущения $\eta^q(s) = (\eta_1(t_{q-1} + s), \eta_2(t_{q-1} + s), \dots, \eta_n(t_{q-1} + s))$.

Введенные выше обозначения позволяют свести исходную задачу (1)—(2) к задаче определения оптимального управления $u = (u^1(s), u^2(s), \dots, u^q(s), \dots, u^N(s))$, которое доставляет минимум функционалу

$$I_0(u) = \sum_{q=1}^N \int_{\Omega_q} \Phi_0(x^q) p(\tau, x_q) dx_q, \quad (3)$$

характеризующему эффективность управления системы, поведение которой на отрезке времени $[t_0, t_k]$ по последовательно примыкающим участкам $[t_{q-1}, t_q]$, $q = 1, \dots, N$, описывается стохастическими дифференциальными уравнениями

$$dX_i^m = \varphi_i(t_{m-1} + s, X^m, X^{m-1}, u^m)ds + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}(t_{m-1} + s, X^m) d\eta_j^m; \quad (4)$$

$$X_i^0(s) = \phi_i(t_0 - \tau + s), X_i^m(0) = X_i^{m-1}(\tau);$$

$$(m = 1, \dots, q), (i = 1, \dots, n), s \in [0, \tau],$$

где $\varphi_i(t_{m-1} + s, x^m, x^{m-1}, u^m)$, $\sigma_{ij}(t_{m-1} + s, x^m)$ — неслучайные, неупреждающие функции, а $\Omega_q =$

$$\bigcup_{m=1}^q \Omega_m; \int_{\Omega_m} = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty}.$$

Правые части (4) равномерно по управлению u^m удовлетворяют известным требованиям [5] существования решения.

Управление $u^q(s)$, определяемое на интервале $[t_{q-1}, t_q]$, в соответствии с принципом оптимальности Беллмана не ухудшает оптимальное управление на предшествующих интервалах. Поэтому при расширении вектора состояния системы по последовательно примыкающим участкам на интервале $[t_{q-1}, t_q]$ в уравнениях (4) рассматривается управление $u_q(s) = (u^{*1}(s), u^{*2}(s), \dots, u^{*m}(s), \dots, u^{*q-1}(s), u^q(s))$, где звездочкой обозначены оптимальные управления, определенные на предшествующих интервалах.

Уравнения (4) описывают на отрезке времени $[t_0, t_k]$ последовательно по примыкающим участкам $[t_{q-1}, t_q]$ диффузионный марковский процесс. Плотность вероятности $p(s, x_q)$ состояний процесса $X(t)$ на отрезках $[t_{q-1}, t_q]$ удовлетворяет уравнению КФП.

Таким образом, при расширении вектора состояний системы стохастическая задача (3), (4) сводится к эквивалентной последовательности детерминированных задач с распределенными параметрами относительно плотности вероятности $p(s, x_q)$ вектора состояний системы:

$$I_0(u) = \sum_{q=1}^N \int_{\Omega_q} \Phi_0(x^q) p(\tau, x_q) dx_q \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\frac{\partial p(s, x_q)}{\partial s} - L(s, x_q, u_q) p(s, x_q) = 0, \quad q = 1, \dots, N, s \in [0, \tau]; \quad (6)$$

$$p(s, x_q) = p(s, x^1) p(s, x^2 | \tau, x^1) p(s, x^3 | \tau, x^2) \dots \dots p(s, x^q | \tau, x^{q-1});$$

$$p(0, x^1) = \delta(x_1 - x_0), p(0, x_q) = p(\tau, x_{q-1}), \quad q = 2, \dots, N, \quad (7)$$

где (7) представляют собой условия сопряжения плотностей распределения $p(s, x_q)$ в узлах t_q ; $L(s, x_q, u_q)(\cdot)$ — эллиптический оператор вида

$$L(s, x_q, u_q)(\cdot) = - \sum_{m=1}^q \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i^m} [A_i^m(s, x^m, x^{m-1}, u^m)(\cdot)] + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^q \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{(\partial x_i^m)^2} [B_{ii}^m(s, x^m)(\cdot)]$$

с коэффициентами сноса

$$A_i^m(s, x^m, x^{m-1}, u^m) = \varphi_i(t_{m-1} + s, x^m, x^{m-1}, u^m) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial \sigma_{ij}(t_{m-1} + s, x^m)}{\partial x_i^m} \sigma_{ij}(t_{m-1} + s, x^m) G_j^\eta$$

и диффузии

$$B_{ii}^m(s, x^m) = \sum_{j=1}^n (\sigma_{ij}(t_{m-1} + s, x^m))^2 G_j^\eta.$$

Алгоритм синтеза оптимального управления. Построим одношаговый алгоритм последовательных приближений к оптимальному решению полученной задачи (5)–(7).

Суть данного алгоритма заключается в варьировании управления u^q , $q = \overline{1, N}$, на участках $[t_{q-1}, t_q]$ в направлении подходящих допустимых вариаций δu^q , обеспечивающих убывание дифференциала Фреше q -го слагаемого целевого функционала (5):

$$\delta I_0^q = \int_{\Omega_q} \Phi_0(x^q) \delta p(\tau, x_q) dx_q \quad (8)$$

на невырожденном конусе касательных вариаций, определенном соотношением

$$\frac{\partial \delta p}{\partial s} - L(s, x_q, u_q) \delta p - (L_{u^q}(s, x_q, u_q) p) \delta u^q = 0; \quad \delta p_0 = 0. \quad (9)$$

Преобразуем (8), выразив δp посредством (9) через независимые вариации δu^q .

Согласно [3] получим

$$\int_{\Omega} \Phi_0(x^q) \delta p(\tau, x_q) dx_q = \int_0^{\tau} M \left(\frac{\partial R_q}{\partial u^q} \right) \delta u^q ds, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} R_q &= L^*(s, x_q, u_q^*) \lambda_q; \\ L^*(s, x_q, u_q^*) (\cdot) &= \\ &= \sum_{m=1}^q \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i^m} [A_i^{(m)}(s, x_q, u^{*m})(\cdot)] + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^q \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{(\partial x_i^{(m)})^2} [B_{ii}^{(m)}(s, x_q)(\cdot)] - \end{aligned}$$

линейный оператор, сопряженный к $L(s, x_q, u_q^*)(\cdot)$, а функция $\lambda_q(s, x_q)$ удовлетворяет сопряженному уравнению

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda}{\partial s} + L^*(s, x_q, u_q^*) \lambda_q &= 0, \quad s \in [\tau, 0]; \\ \lambda_q(\tau, x_q) &= \alpha_q \Phi_0(x^q), \quad \alpha_q > 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставим (10) в (8). Тогда дифференциал Фреше целевого функционала (5) примет следующий вид:

$$\delta I_0^q = \int_0^{\tau} M \left(\frac{\partial R_q}{\partial u^q} \right) \delta u^q ds. \quad (12)$$

Правая часть (12) — линейный функционал относительно непрерывных дифференцируемых функций δu^q на $L_2[0, \tau]$, поскольку

$$M \left(\frac{\partial R_q}{\partial u^q} \right) = \int_{\Omega_q} \frac{\partial R_q}{\partial u^q} p(s, x_q) dx_q$$

(в силу основных свойств интеграла и линейности оператора) — ограниченный линейный функционал на множестве функций $p(s, x_q) \in C^{1,2}$ со значениями из E_r .

Поскольку $L_2[0, \tau]$ — подмножество гильбертова пространства, то согласно теореме Шварца [9] градиент Фреше целевого функционала q -го слагаемого целевого функционала (5) с учетом (9) примет следующий вид:

$$I_0^{q'}(\cdot) = M \left(\frac{\partial R_q}{\partial u^q} \right) (\cdot). \quad (13)$$

Дифференциал Фреше (12) с учетом (9) определяет направление убывания целевого функционала (5).

Таким образом, направление δu^q убывания (12) задается формулой

$$\delta u^q = M \left(\frac{\partial R_q}{\partial u^q} \right). \quad (14)$$

Следовательно, для поиска оптимального управления можно строить одношаговую итерационную последовательность на $L_2[0, \tau]$ вида

$$u^{q^{n+1}} = u^{q^n} - h^{q^n} \delta u^{q^n}, \quad q = \overline{1, N}. \quad (15)$$

Здесь n — номер итерации, h^{q^n} — шаг на n -й итерации, вариация δu^{q^n} на каждом шаге вычисляется по формуле (14).

Таким образом, алгоритм синтеза искомого оптимального управления, являющегося решением задачи (5)–(7), сводится к следующей пятишаговой процедуре.

1. С исходным приближением управления u^{q^n} , $n = 1, 2, \dots$; $q = \overline{1, N}$ решается задача Коши для уравнения КФП (6) на участке $[t_{q-1}, t_q]$ и определяются исходное приближение $p^n(s, x_q)$ и значение целевого функционала $I_0^q(p, u^q)$.
2. Решается задача Коши для уравнения (11) для определения R_q и градиента $\frac{\partial R_q}{\partial u^q}$.
3. Вычисляется направление δu^{q^n} по формуле (14).
4. Затем по формуле (15) вычисляются значения нового приближения $u^{q^{n+1}} = u^{q^n} - h^{q^n} \delta u^{q^n}$.

5. Если $|\delta u^{q^n}| \leq \varepsilon$, то решение задачи (5)–(7) на участке $[t_{q-1}, t_q]$ с точностью $\varepsilon > 0$ прекращается. В противном случае решение продолжается исходя из нового приближения.

Заключение. Сформулированный алгоритм представляет собой естественное обобщение метода проекции градиента.

Основной сложностью в реализации вычислительного процесса является необходимость решения уравнения Колмогорова—Фоккера—Планка (6) и сопряженного с ним параболического уравнения Беллмана (11). Для преодоления данной проблемы можно воспользоваться одной из существующих методик решения уравнений КФП [10, 11], либо использовать приближенный метод [12], базирующийся на разложении плотности вероятности в функциональный ряд по семиинвариантам случайного процесса.

Для реализации алгоритма на ЭВМ можно использовать математические процессоры MathCad и MathLab, либо разработать собственные программные продукты на языках структурного (C, Basic, Pascal и т. п.) и объектно-ориентированного программирования (C++, Object Pascal, C#, Java и т. д.). В частности, существует реализация вышеизложенного алгоритма в средах быстрой разработки приложений Delphi и Microsoft Visual Studio на языках Object Pascal и C# применительно к отдельным задачам поиска оптимального управления летательным аппаратом.

Список литературы

1. Полосков И. Е. Расширение фазового пространства в задачах анализа дифференциально-разностных систем со случайным входом // Автоматика и телемеханика. 2002. № 9. 58—73.
2. Царьков Е. Ф. Системы стохастических дифференциальных уравнений с запаздыванием // Известия АН Латвийской ССР. 1968. № 1. 57—64.

3. Роднищев Н. Е. Оптимизация управления нелинейных стохастических систем с ограничениями // Автоматика и телемеханика. 2001. № 2. 87—100.
4. Frank T. D. Multivariate Markov processes for stochastic systems with delays: Application to the stochastic Gompertz model with delay // PHYSICAL REVIEW E 66.011914. 2002.
5. Евланов Л. Г., Константинов В. М. Системы со случайными параметрами. М.: Наука, 1976.
6. Параев Ю. И. Введение в статистическую динамику процессов управления и фильтрации. М.: Сов. радио. 1976.
7. Роднищев Н. Е. Принцип оптимальности в среднем толерантных систем // Изв. вузов. Авиационная техника. 1986. № 2.
8. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкредидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969.
9. Иоффе А. Д., Тихомиров В. М. Теория экстремальных задач. М.: Наука, 1975.
10. Красовский А. А. Фазовое пространство и статистическая теория динамических систем. М.: Наука, 1974.
11. Саульев В. К., Черников А. А. Решение уравнения Фоккера—Планка—Колмогорова методом конечных разностей // Автоматика и телемеханика. 1990. № 3.
12. Роднищев Н. Е. Приближенный анализ точности дискретного оптимального управления нелинейных стохастических систем методом семинвариантов // Изв. вузов. Авиационная техника. 1987. № 1.

УДК 007.004.3

В. В. Сафронов, д-р техн. наук, проф.,
Л. Г. Быстров, соискатель,
 вед. инженер-программист,
 ОАО "КБ Электроприбор", г. Саратов
 svv@kber.ru

Построение и ранжирование полного множества матриц, сопровождающих характеристический полином, в задачах моделирования, анализа и синтеза САУ

Рассматривается задача построения полного множества матриц, применяемых при использовании метода пространства состояний, частными случаями которых являются матрицы Фробениуса и Гессенберга. Предлагается алгоритм решения, приведены соотношения для определения числа таких матриц. Приоритетное расположение матриц предлагается осуществить с помощью метода "жесткого" ранжирования. Для использования метода введены специальные критерии. Рассмотрен числовой пример.

Ключевые слова: система управления, метод пространства состояний, характеристический полином, сопровождающие матрицы, метод ранжирования.

Введение

При анализе и синтезе систем автоматического управления широкое применение нашел метод пространства состояний (МПС) [1]. Как правило, в математических моделях при этом используются матрицы Фробениуса (F) и Гессенберга (G) [2, 3].

Например, для приведенного дифференциального уравнения пятого порядка

$$y^{(5)} + a_4y^{(4)} + a_3y^{(3)} + a_2y'' + a_1y' + a_0y = f(t)$$

матрицы Фробениуса и Гессенберга имеют, соответственно, вид:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} -a_4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -a_3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Они являются матрицами, сопровождающими свой характеристический полином

$$P(s) = s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0.$$

Здесь a_4, a_3, \dots, a_0 — постоянные коэффициенты; $y(t), y'(t), \dots, y^{(5)}(t)$ — выходной сигнал и его производные до пятого порядка включительно; $f(t)$ — входное воздействие; s — аргумент характеристического полинома (характеристического уравнения).

Достоинства матрицы Фробениуса: без пересчета определяются начальные условия $x_1(0) = y(0), x_2(0) = y'(0), \dots, x_n(0) = y^{(n-1)}(0)$; по модели можно определить функцию и все ее производные.

Однако при использовании матрицы Фробениуса весьма сложно адекватно отобразить в схеме модели входные воздействия в виде функции Дирака и ее производных.

Достоинство матрицы Гессенберга: позволяет корректно отобразить в схеме модели воздействия в виде функции Дирака и ее производных до $(n - 1)$ -го порядка включительно.

Вместе с тем, при использовании матрицы Гессенберга на выходе модели можно получить только регулируемую координату без производных. Кроме того, необходимо осуществлять пересчет начальных условий.

Представляет научный и прикладной интерес отыскание полного множества матриц, сопровождающих характеристический полином, которые имели бы стандартную структуру, обладали комбинацией достоинств матриц Фробениуса и Гессенберга. Решению такой задачи и посвящена данная статья.

Алгоритм построения полного множества матриц, сопровождающих характеристический полином

Исходной информацией для построения полного множества матриц A_α , $\alpha = \overline{1, N}$, включающего как частные случаи матрицы Фробениуса и Гессенберга, служит приведенное дифференциальное уравнение n -го порядка $y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_1y' + a_0y = f(t)$ либо характеристический полином n -го порядка $(n = 2, 3, \dots)$.

Пронумеруем диагонали, которые лежат ниже и выше главной диагонали. Будем считать, что главная диагональ имеет номер n , выше нее лежит диагональ с номером $(n + 1)$, ниже главной диагонали лежит диагональ с номером $(n - 1)$, затем с номером $(n - 2)$ и т. д. до номера 1. На первой диагонали лежит элемент, расположенный на пересечении первого столбца и n -й строки.

Вспомним, что нильпотентной матрицей n -го порядка называют матрицу вида [3]

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, у этой матрицы все элементы, расположенные на диагонали $(n + 1)$ — единицы, а остальные элементы — нули.

С учетом сделанных замечаний, алгоритм построения полного множества матриц, сопровождающих

характеристический полином, выглядит следующим образом.

1. Сформировать нильпотентную матрицу n -го порядка.
2. В левом нижнем углу матрицы (на первой диагонали) поместить свободный член $-a_0$.
3. Старший коэффициент $-a_{n-1}$ поместить в любую клетку главной диагонали с номером i , $i = 1, 2, \dots, n$. Члены $-a_0$ и $-a_{n-1}$ лежат соответственно в левом нижнем и правом верхнем углах подматрицы, порядок которой равен $(n - i) \times i$. Остальные коэффициенты размещаются только в этой подматрице.
4. Коэффициенты $-a_1, -a_2, \dots, -a_{n-2}$ разместить, соответственно, в одной из клеток второй, третьей, ..., $(n - 1)$ -й диагонали.

После определения места для коэффициента $-a_{n-2}$ искомая матрица будет построена. Перебором мест расположения коэффициентов определим полное множество матриц. Заметим, что при размещении коэффициента $-a_{n-1}$ в клетке n, n имеем матрицу Фробениуса, а при размещении этого же коэффициента в клетке $1, 1$ получим матрицу Гессенберга. Определим полное число N сопровождающих матриц. Для четных n имеем

$$N = \sum_{m=0}^{n-1} ((n - m)!)^2 (n - m)^{(2m+1)},$$

а для нечетных n —

$$N = \sum_{m=0}^{n-1} ((m + 1)!)^2 (m + 1)^{(n-2)(m+1)}.$$

В табл. 1 приведены значения N для $n = \overline{2, 13}$.

Как следует из табл. 1, число сопровождающих матриц даже для сравнительно невысокого порядка исходного дифференциального уравнения весьма велико. При моделировании САУ возникает естественный вопрос об определении предпочтительного использования интересующих нас матриц по совокупности принятых критериев, которые определены ниже. Для его разрешения можно воспользоваться, например, методом "жесткого" ранжирования [4].

Таблица 1
Число сопровождающих матриц $N = f(n)$

n	N	n	N	n	N
2	2	6	106	10	53 578
3	4	7	426	11	322 650
4	10	8	1930	12	2 106 250
5	30	9	9190	13	14 790 810

Ранжирование матриц, сопровождающих характеристический полином

Для определения приоритетного расположения матриц введем следующие критерии:

$K_1(A_\alpha)$ — число производных в схеме модели, доступных измерению;

$K_2(A_\alpha)$ — число координат в схеме модели, значения которых, будучи поданными на входы интеграторов, позволят получить результат, аналогичный тому, который был бы получен при использовании производных, измерить которые не представляется возможным;

$K_3(A_\alpha)$ — число пересчитываемых начальных условий;

$K_4(A_\alpha)$ — число, характеризующее глубину пересчета начальных условий. Оно определяется по коду матрицы.

Код матрицы представляет собой последовательное расположение кодов каждого из коэффициентов $-a_0, -a_1, \dots, -a_{n-1}$. В свою очередь, код коэффициентов зависит от их расположения в строках матрицы. Коэффициент, расположенный в n -й строке матрицы, имеет код "0", в $(n-1)$ -й строке матрицы — код "1" и т. д., в первой строке матрицы — $(n-1)$.

В частных случаях для матрицы Фробениуса имеем код "00...0", а для матрицы Гессенберга "0123...(n-1)". Число $K_4(A_\alpha)$ формально отличается от кода отсутствием нулей в старших разрядах. Оно показывает разность между значениями начальных условий до пересчета и после их пересчета.

Из смысла введенных критериев ясно, что чем значения первых двух критериев больше, а третьего и четвертого меньше, тем при прочих равных условиях анализируемая матрица предпочтительнее. Коэффициентами важности критериев можно определить предпочтение в смысле матрицы Фробениуса, либо в смысле матрицы Гессенберга.

В частных случаях для матрицы Фробениуса имеем $K_1(A_\alpha) = n, K_2(A_\alpha) = 0, K_3(A_\alpha) = n, K_4(A_\alpha) = 0$, а для матрицы Гессенберга $K_1(A_\alpha) = 0, K_2(A_\alpha) = n, K_3(A_\alpha) = 0, K_4(A_\alpha) = 123...(n-1)$.

Для постановки задачи многокритериального ранжирования введем необходимые в дальнейшем обозначения:

$A = \{A_\alpha, \alpha = \overline{1, N}\}$ — множество матриц, сопровождающих характеристический полином, где N — число таких матриц.

$K_j(A_\alpha), j = \overline{1, r}$ — частные критерии, характеризующие матрицу A_α .

$K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\}$ — векторный критерий, характеризующий матрицу A_α .

$A_{kv} = \{a_j, j = \overline{1, r}\}$ — множество коэффициентов важности критериев, a_j — коэффициент важности j -го критерия, причем $\sum_{j=1}^r a_j = 1$.

A^p — множество эффективных вариантов матриц (Парето-оптимальных) с числом элементов n^p ($A^p \subset A$).

$A_p^0 \in A^p$ ($A_p^0 \in A_R^p$) — варианты матриц, которые входят в множество эффективных решений, $p \in \{1, 2, \dots, n\}$.

$P = (A_{k_1}^0, A_{k_2}^0, \dots, A_{k_{n^p}}^0)$ — упорядоченное множество эффективных вариантов матриц (кортеж Парето); элементы кортежа ранжированы в соответствии с решающими правилами так, что выполняется условие

$$A_{k_1}^0 \succ A_{k_2}^0 \succ \dots \succ A_{k_{n^p}}^0,$$

где " \succ " — знак отношения доминирования, $k_i \in \{1, n^p\}$.

Допустим, известны множества $A_{kv}, K(A_\alpha)$, решающие правила [4].

Требуется найти множество эффективных упорядоченных вариантов матриц (кортеж Парето) P , для элементов которого справедливо

$$K(A_p^0) = \min_{A_\alpha \in A} K(A_\alpha), A_p^0 \in P. \quad (1)$$

В ходе решения задачи будем анализировать множество упорядоченных пар матриц A_k, A_l ($k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l$), а результат анализа заносить в специальную оценочную матрицу $\|C_{kl}\|$.

Сущность метода заключается в следующем [4].

1. На основе попарного сравнения матриц A_k, A_l ($k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l$) определяем элементы C_{kl} оценочной матрицы $\|C_{kl}\|$. Значения элементов C_{kl} подбирают таким образом, чтобы отсеять неэффективные варианты матриц. У эквивалентных матриц A_k, A_l все соответствующие критерии равны. Полагаем $C_{kl} = 1, C_{lk} = 1$. К числу неэффективных вариантов матриц отнесем варианты, у которых:

а) все значения критериев k -го варианта хуже, чем у l -го варианта, тогда полагаем $C_{kl} = N_2 \gg 1$;

б) значения m ($m < r$) критериев k -го варианта хуже соответствующих значений критериев l -го варианта при равных соответствующих значениях остальных критериев этих вариантов. Тогда полагаем $C_{kl} = N_3, 1 \ll N_3 < N_2$.

Если же для матриц A_k, A_l имеем лучшие, худшие и, возможно, равные критерии, то значение C_{kl} определим по следующему методу.

Обозначим $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^=$ — соответственно подмножества номеров лучших, худших и равных критериев для каждой пары вариантов A_k, A_l ($k = \overline{1, n}$; $l = \overline{1, n}$; $k \neq l$). Будем осуществлять попарное сравнение вариантов матриц A_k, A_l на основе анализа критериев $K_j(A_k), K_j(A_l)$, $j = \overline{1, r}$. Для возможных значений подмножеств номеров $N_{kl}^+, N_{kl}^-, N_{kl}^=$ соответственно лучших, худших и равных критериев введем следующие значения элементов оценочной матрицы $\|C_{kl}\|$:

- если $N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^= = \{\overline{1, r}\}$, (2)

то $C_{kl} = 1, C_{lk} = 1$; (3)

- если $N_{kl}^+ = \{\overline{1, r}\}, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^= = \emptyset$, (4)

то $C_{kl} = N_2, C_{lk} = 0, N_2 \gg 1$; (5)

- если $N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- = \{\overline{1, r}\}, N_{kl}^= = \emptyset$, (6)

то $C_{kl} = 0, C_{lk} = N_2$; (7)

- если $N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- = \emptyset, N_{kl}^= \neq \emptyset$, (8)

то $C_{kl} = N_3, C_{lk} = 0, 1 \ll N_3 < N_2$; (9)

- если $N_{kl}^+ = \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, N_{kl}^= \neq \emptyset$, (10)

то $C_{kl} = 0, C_{lk} = N_3$; (11)

- если $N_{kl}^+ \neq \emptyset, N_{kl}^- \neq \emptyset, |N_{kl}^=| \geq 0$, (12)

то определим C_{kl} в виде [5]:

$$C_{kl} = \sum_{j \in N_{kl}^+} a_j \left(\sum_{j \in N_{kl}^-} a_j \right)^{-1}, C_{lk} = C_{kl}^{-1}. \quad (13)$$

2. Для формулировки решающих правил введем числа: H_l — число элементов в l -м столбце оценочной матрицы, значение которых больше единицы; M_l — число элементов в l -м столбце той же матрицы, значение которых меньше единицы; $C_{kl \max}$ — максимальное значение элемента в l -м столбце матрицы $\|C_{kl}\|$.

Физический смысл чисел следующий: H_l показывает, сколько вариантов матриц из рассматриваемого множества доминируют l -ю матрицу; M_l — сколько вариантов доминирует l -я матрица; $C_{kl \max}$ определяет, во сколько раз l -я матрица "превышается" k -й матрицей ($k \in \{\overline{1, n}\}, k \neq l$).

3. Для реализации "жесткого" ранжирования перейдем от одношагового процесса поиска приоритетного расположения вариантов матриц в кортеже Парето к многошаговому процессу [6].

Общая идея заключается в следующем. На каждом шаге t ($t = 1, 2, \dots, n - 1$) выбираем j -ю матрицу, лучшую с точки зрения предлагаемого ниже решающего правила. Затем ее номер включаем в множество P , и в последующем рассмотрении j -я матрица больше не участвует (в матрице $\|C_{kl}\|$ вычеркиваем j -ю строку и j -й столбец). Указанная процедура позволяет исключить влияние матрицы A_j на выбор лучшего варианта матрицы, проводимого уже на шаге $(t + 1)$.

Решающие правила "жесткого" ранжирования

1. Ранжирование необходимо проводить среди эффективных вариантов матриц по шагам. Число шагов $t \leq n - 1$.

2. На каждом шаге t ($t = 1, 2, \dots, n - 1$):

- найти числа $H_l^{(t)}, M_l^{(t)}, C_{kl \max}^{(t)}$ и определить лучший вариант матрицы A_j с минимальным значением $H_j^{(t)}$ и $C_{lj} \geq 1 \forall l \in \{\overline{1, n}\}, l \neq j$;
- номер j занести в множество P ;
- исключить из оценочной матрицы j -ю строку и j -й столбец.

Если матрицы с номерами $l_j \in L_{k(t)} = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{k(t)}\}$ имеют одинаковые минимальные значения $H_{l_j}^{(t)}$, то лучшим является вариант матрицы A_{l_j} с максимальным значением $M_{l_j}^{(t)} = \max_{l_j \in L_{k(t)}} M_{l_j}^{(t)}$.

3. Если матрицы с номерами $l_j \in L_{k(t)} = \{l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_{k(t)}\}$ имеют соответственно одинаковые значения $H_{l_j}^{(t)}, M_{l_j}^{(t)}$, то из оценочной матрицы выделить подматрицу с номерами столбцов и строк l_j ($j = \overline{1, k(t)}$) и провести ранжирование ее элементов.

4. Эквивалентные варианты матриц $A_{l_j}, l_j \in L_m \subseteq L_k$ упорядочить на основе анализа чисел $H_l^{(1)}, M_l^{(1)}, C_{kl \max}^{(1)}$, полученных на первом шаге.

Числовой пример

Для дифференциального уравнения четвертого порядка: построить полное множество матриц, сопровождающих характеристический полином; ранжировать матрицы для двух вариантов значений коэффициентов важности критериев:

а) $a_1 = 0,05, a_2 = 0,7, a_3 = 0,1, a_4 = 0,15;$

б) $a_1 = 0,15, a_2 = 0,3, a_3 = 0,3, a_4 = 0,25.$

Решение. Как следует из табл. 1, число матриц равно 10. Две из них — это матрицы Фробениуса и Гессенберга, остальные матрицы получены и приводятся впервые:

$$F = A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix}; G = A_2 = \begin{bmatrix} -a_3 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & 0 \end{bmatrix}; A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -a_2 & -a_3 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; A_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & 0 & -a_3 & 1 \\ -a_0 & 0 & -a_2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_3 & 1 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; A_8 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & -a_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & -a_3 & 1 & 0 \\ -a_1 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; A_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_3 & 1 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & 0 & 1 \\ -a_0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Значения критериев $K_1(A_\alpha), K_2(A_\alpha), K_3(A_\alpha)$ приведены в табл. 2.

Рассмотрим решение задачи многокритериального ранжирования, которое проведем на основе предлагаемого выше алгоритма.

1. Первая оценочная матрица, построенная для коэффициентов важности $a_1 = 0,05, a_2 = 0,7, a_3 = 0,1, a_4 = 0,15$, представлена в табл. 3.

2. Анализ оценочной матрицы позволяет получить характерные числа $H_l^{(1)}, M_l^{(1)}, C_{kl\max}^{(1)}$, которые приведены в табл. 4.

3. Анализ табл. 4 показывает, что с четвертой по десятую матрицы являются неэффективными по принятой системе критериев [4]. Исключаем их из рассмотрения (в оценочной матрице вычеркиваем с четвертой по десятую строки и с четвертого по десятый столбцы).

4. Ход дальнейших решений представлен в табл. 5—8.

Лучшей является матрица A_2 . Включаем ее в кортеж Парето P . В табл. 5 удаляем вторую строку и второй столбец. Получаем оценочную матрицу (табл. 7) и характерные числа (табл. 8).

5. Лучшей на шаге 3, в соответствии с принятыми правилами, является матрица A_3 . В результате получим следующий кортеж Парето $P = \langle A_2, A_3, A_1 \rangle$.

Таблица 2

A_α	$K_1(A_\alpha)$	$K_2(A_\alpha)$	$K_3(A_\alpha)$	$K_4(A_\alpha)$
A_1	4	0	4	0
A_2	0	4	0	123
A_3	1	3	3	1
A_4	1	3	3	11
A_5	1	3	3	111
A_6	1	3	3	101
A_7	1	3	2	12
A_8	1	3	2	202
A_9	1	3	2	122
A_{10}	1	3	2	112

Таблица 3

Оценочная матрица

Матрицы	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A_1	—	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
A_2	2,33	—	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	5,7	2,33	2,33
A_3	2,33	0,43	—	N_3						
A_4	2,33	0,43	0	—	N_3	N_3	N_3	N_3	N_3	N_3
A_5	2,33	0,43	0	0	—	0	0,7	N_3	N_3	N_3
A_6	2,33	0,43	0	0	N_3	—	0,7	N_3	N_3	N_3
A_7	2,33	0,43	0	0	1,5	1,5	—	N_3	N_3	N_3
A_8	2,33	0,43	0	0	0	0	0	—	0	0
A_9	2,33	0,18	0	0	0	0	0	N_3	—	0
A_{10}	2,33	0,43	0	0	0	0	0	N_3	N_3	—

Таблица 4

Характерные числа

$H_l^{(1)}$	9	0	1	2	5	4	3	8	7	6
$M_l^{(1)}$	0	9	8	7	4	6	6	1	2	3
$C_{kl\max}^{(1)}$	2,33	0,43	2,33	N_3						

Таблица 5

Оценочная матрица

Матрицы	A_1	A_2	A_3
A_1	—	0,43	0,43
A_2	2,33	—	2,33
A_3	2,33	0,43	—

Таблица 6

Характерные числа

$H_l^{(2)}$	2	0	1
$M_l^{(2)}$	0	2	1
$C_{kl\max}^{(2)}$	2,33	0,43	2,33

Таблица 7

Оценочная матрица

Матрицы	A_1	A_3
A_1	—	0,43
A_3	2,33	—

Таблица 8

Характерные числа

$H_l^{(3)}$	1	0
$M_l^{(3)}$	0	1
$C_{kl\max}^{(3)}$	2,33	0,43

Для второго блока коэффициентов важности кортеж Парето имеет вид $P = \langle A_1, A_3, A_2 \rangle$, т. е. третья матрица вновь оказалась на втором месте. Анализ результатов решения позволяет сделать вывод о том, что предпочтение следует отдать третьей матрице.

Заключение

Рассмотрена задача построения полного множества матриц, сопровождающих характеристический полином. Приведена методика ее решения. Оказалось, что даже для дифференциального уравнения сравнительно невысокого порядка число таких матриц исчисляется десятками-сотнями тысяч. Приоритетное расположение матриц по совокупности принятых критериев осуществляется с помощью метода "жесткого" ранжирования. При этом выбираются матрицы, в наибольшей степени удовлетворяющие принятым критериям.

Список литературы

1. **Справочник** по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.
2. **Арнольд В. И.** Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука. Физматлит, 1975. 240 с.
3. **Тихонов А. Н., Васильева А. Б., Свешникова А. Г.** Дифференциальные уравнения: Учеб. для вузов. М.: Наука. Физматлит, 1998. 232 с.
4. **Сафронов В. В.** Гипервекторное ранжирование сложных систем // Информационные технологии. 2003. № 5. С. 23—27.
5. **Рух Б.** Проблемы и методы решений в задачах со многими целевыми функциями // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 20—58.
6. **Белкин А. Р., Левин М. Ш.** Принятие решений: комбинаторные модели аппроксимации информации. М.: Наука, 1990. 160 с.

ИНФОРМАЦИЯ

28 сентября—4 октября 2009 г.

в пос. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края
в рамках Международной научно-технической мультikonференции

"Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники" (ИКТМР-2009)

состоится локальная научно-техническая конференция

"МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ" (МАУ-2009)

Председатель — член-корр. РАН Е. Д. Теряев

Направления конференции

- ◆ Проблемы управления в мехатронных системах
- ◆ Проблемы интеллектуализации и миниатюризации мехатронных систем
- ◆ Функциональные элементы мехатронных систем
- ◆ Проектирование и моделирование мехатронных систем
- ◆ Проблемно-ориентированные мехатронные системы

Подробную информацию о мультikonференции ИКТМР-2009 и локальной конференции МАУ-2009
см. на сайте <http://www.mvs.tsure.ru>

Н. А. Дударенко, канд. техн. наук, доц.,
М. В. Полякова, аспирант,
А. В. Ушаков, д-р техн. наук, проф.,
 Санкт-Петербургский государственный
 университет информационных технологий,
 механики и оптики,
 dudarenko@yandex.ru

Достаточные алгебраические условия обобщенной синхронизируемости многоканальных динамических объектов

Рассматриваются алгебраические условия обобщенной синхронизируемости многоканальных динамических объектов, которые формируются на основе геометрической постановки задачи синхронного движения как движения в линейной оболочке, натянутой на задающий вектор. Примерами рассматриваемых систем являются технологические процессы по обработке материальных и обслуживанию гуманитарных потоков, в которых многоагрегатные компоненты участвуют в формировании совокупного результата и функционируют как "единое целое".

Ключевые слова: динамическая система, многомерный вход—многомерный выход, синхронное движение, алгебраические условия, собственный вектор.

Введение

В современной практике организации технологических процессов по обработке материальных и обслуживанию гуманитарных потоков встречаются задачи, в которых многоагрегатные компоненты участвуют в формировании совокупного продукта (результата) и функционируют как "единое целое". Примерами [1] таких технологических процессов по обработке материальных потоков являются процессы формирования и подачи ленточного материала в листопрокатном производстве, в производстве бумаги и тканей, процессы динамической юстировки многокомпонентных оптических и радиооптических систем, заготовительные процессы в составе "бесскладовых" технологических производств и т. д. Примерами технологических процессов по обслуживанию гуманитарных потоков являются процессы движения строим подвижных технических средств, управляемых антропокомпонентами-операторами (строй самолетов, вертолетов, автомобилей и т. п.), и автономных антропокомпонентов (строй военнослужащих, спортсменов и т. п.).

Основным требованием к системам управления, встраиваемым в техническую среду отмеченных выше технологических процессов, является обеспечение синхронности функционирования динамиче-

ских агрегатов в составе многоагрегатного процесса. Отметим, что условие обеспечения синхронного функционирования агрегатов не должно накладывать сильных ограничений на динамику технологического процесса.

Исследования показали, что при геометрической постановке задачи управления многоагрегатными комплексами, обеспечивающего их синхронное функционирование, она сводится к алгебраическому требованию обеспечения определенной структуры собственных векторов линейного оператора динамической системы "многомерный вход—многомерный выход" (МВМВ) [2].

Попытки решить задачу обеспечения синхронного функционирования многоагрегатных объектов МВМВ-типа были предприняты в работах [3, 4, 5]. Они опирались на возможности алгебраических свойств линейного оператора, представленного передаточной матрицей МВМВ-типа. Использование для этих целей векторно-матричных представлений метода пространства состояний существенно расширило возможности решения поставленной задачи.

Постановка задачи синтеза системы управления многоканальным объектом

Постановка задачи синтеза управления многоагрегатным динамическим объектом МВМВ-типа, обеспечивающего по выходу синхронное функционирование, формируется на основе использования векторно-матричного модельного представления этих процессов в форме

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где u , x , y — соответственно векторы управления, состояния и выхода объекта; $u, y \in R^m$, $x \in R^n$; A , B , C — соответственно матрицы состояния, управления и выхода, согласованные по размерности с временными объекта.

Сформулируем геометрическую трактовку задачи обеспечения синхронного функционирования агрегатов многоканального технического объекта (1).

Геометрическая постановка задачи синхронного изменения компонент y_l ($l = \overline{1, m}$) m -мерного вектора выхода y объекта (1) под действием m -мерного вектора задающего воздействия $g(t)$ принимает вид

$$y(t) \in L_c\{g_0\} \text{ для } \forall t, \quad (2)$$

где $L_c\{g_0\}$ — линейная оболочка, натянутая на вектор g_0 , который порождает задающий вектор $g(t)$,

параметризованный временем t и обладающий свойством вида (2)

$$g(t) \in L_c\{g_0\} \text{ для } \forall t. \quad (3)$$

При этом требуемая динамика синхронного движения компонент вектора $y(t)$, заданного в форме (2), будет определяться динамикой изменения задающего воздействия $g(t)$ в линейной оболочке, натянутой на g_0 , задаваемой в форме

$$g(t) = \psi(t)g_0, \quad (4)$$

где $\psi(t)$ — скалярная функция, задающая динамику желаемого развития процессов объекта (1), удовлетворяющих условию (2).

Введем два определения.

Определение 1. Будем называть задачу синхронизации задачей синхронизации в общепринятом смысле, если все компоненты вектора g_0 равны друг другу.

В этом случае скорости и ускорения изменения всех компонент, подчиненных условию (4), равны друг другу.

Определение 2. Будем называть задачу синхронизации обобщенной задачей синхронизации, если компоненты вектора g_0 произвольны.

В этом случае скорости и ускорения изменения всех компонент, подчиненных условию (4), могут отличаться друг от друга.

Решение задачи синтеза системы управления объекта (1) будем искать в классе аналитических законов управления в виде

$$u(t) = K_g g(t) - Kx(t), \quad (5)$$

где K_g, K — соответственно матрицы прямой связи по задающему воздействию и отрицательной обратной связи по вектору состояния объекта (1). При построении закона управления в форме (5) использована априорная гипотеза о полной измеримости вектора задающего воздействия $g(t)$ и вектора состояния объекта $x(t)$.

Объект управления (1) и управляющее устройство (5) образуют замкнутую систему управления:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Fx(t) + Gg(t); \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $F = A - BK, G = BK_g$.

Для анализа алгебраических свойств матричных функций от матриц целесообразно перейти к описаниям полученных выше векторно-матричных представлений с использованием лапласовых образов их переменных. Применение преобразования Лапласа к (4) дает

$$g(s) = \psi(s)g_0. \quad (7)$$

В свою очередь, переход в (6) к лапласовым образам позволяет записать

$$\begin{aligned} y(s) &= C(sI - F)^{-1}x(0) + C(sI - F)^{-1}Gg(s)|_{x(0)=0} = \\ &= (sI - F)^{-1}Gg(s); x(0) = x(t)|_{t=0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подстановка в (8) условия (7) дает

$$\begin{aligned} y(s) &= C(sI - F)^{-1}Gg(s)|_{g(s)=\psi(s)g_0} = \\ &= C(sI - F)^{-1}G\psi(s)g_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $y(s), g(s)$ — лапласовы образы соответственно вектора выхода и вектора задающего входного воздействия; $\psi(t), \psi(s)$ — скалярная функция соответственно времени t и комплексной переменной s , задающая динамику желаемого развития процессов в объекте.

Достаточные условия обобщенной синхронизируемости многоканальных объектов

Расчет искомых числовых матриц K_g и K в законе управления (5) основан на алгебраических свойствах матричных компонент соотношения (9) и гипотезе о возможности его представления в виде

$$\begin{aligned} y(s) &= C(sI - F)^{-1}G\psi(s)g_0 = \\ &= C(sI - F)^{-1}BK_g\psi(s)g_0 = \zeta(s)g_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\zeta(x)$ — скалярная функция, обратное преобразование Лапласа которой определяет динамику изменения вектора выхода объекта (1) в линейной оболочке $L_c\{g_0\}$, доставляя системе управления (6) обобщенное синхронное изменение компонент вектора выхода $y(t)$ в форме (3).

Здесь основной результат содержится в следующих утверждениях.

Утверждение 1. Для того чтобы $y(t) \in L_c\{g_0\}$ или чтобы выполнялось соотношение $y(s) = \zeta(s)g_0$, где $\zeta(s)$ — скалярная функция переменной s , имеющая вещественнозначное обратное преобразование Лапласа, достаточно выполнения следующих условий:

1. Вектор $BK_g g_0$ — правый собственный вектор матрицы состояния F , т. е. выполняется соотношение

$$F(BK_g g_0) = \lambda_i(BK_g g_0), \quad (11)$$

где $\lambda_i (i = \overline{1, n})$ — одно из вещественных собственных значений матрицы F .

2. Вектор g_0 — правый собственный вектор матрицы CBK_g , т. е. выполняется равенство

$$(CBK_g)g_0 = \lambda_{gl}g_0, \quad (12)$$

где $\lambda_{gl} (l = \overline{1, m})$ — одно из вещественных собственных значений матрицы CBK_g , так что матрица прямой связи K_g ищется из условия

$$K_g = \arg\{(CBK_g)g_0 = \lambda_{gl}g_0\}. \quad \square(13)$$

Доказательство. Рассмотрим векторно-матричное выражение (10).

Используя известные свойства матричной функции $f(F)$ [6]

$$f(F)\xi_i = f(\lambda_i)\xi_i, \quad (14)$$

на основании (11) и (14) можно получить для матричной функции от матрицы $f(F) = (sI - F)^{-1}$ соотношение

$$(sI - F)^{-1}BK_g g_0 = (s - \lambda_i)^{-1}BK_g g_0. \quad (15)$$

Подстановка (15) во второе представление выражения (10) дает

$$y(s) = CBK_g g_0 \psi(s)(s - \lambda_i)^{-1}. \quad (16)$$

Если в (16) учесть (12), то получим

$$\begin{aligned} y(s) &= \lambda_{gl} \psi(s)(s - \lambda_i)^{-1} g_0 = \zeta(s) g_0, \\ \zeta(s) &= \lambda_{gl} \psi(s)(s - \lambda_i)^{-1}. \quad \blacksquare (17) \end{aligned}$$

Заметим, что собственные числа λ_i выбираются из требований к динамике развития процессов по выходу в подпространство $L_c\{g_0\}$.

Альтернативой полученному результату являются положения следующего утверждения.

Утверждение 2. Для того чтобы $y(t) \in L_c\{g_0\}$ или чтобы выполнялось соотношение $y(x) = \zeta(s)g_0$, где $\zeta(s)$ — скалярная функция переменной s , имеющая вещественнозначное обратное преобразование Лапласа, достаточно, чтобы выполнялись условия:

1. Вектор $BK_g g_0$ удовлетворяет соотношению (11), а следовательно, — (15).

2. Матрица CBK_g — единичная, т. е. применительно к матрице K_g выполняется соотношение

$$K_g = \arg\{CBK_g = I\}. \quad \square (18)$$

Доказательство.

Если в (16) учесть (18), то получим

$$\begin{aligned} y(s) &= g_0(s - \lambda_i)^{-1} \psi(s) = (s - \lambda_i)^{-1} \psi(s) g_0 = \zeta(s) g_0, \\ \text{где } \zeta(s) &= (s - \lambda_i)^{-1} \psi(s). \quad \blacksquare (19) \end{aligned}$$

При более широком рассмотрении задачи синтеза выбор матриц C и B объекта управления и матрицы K_g закона управления должны формироваться из условия

$$(C, B, K_g) = \arg\{CBK_g = I\}. \quad (20)$$

Как и в случае утверждения 1, собственные числа λ_i выбираются из требований динамики развития процессов в подпространстве $L_c\{g_0\}$.

Утверждение 3. Матрица M , приводящая произвольную $(n \times n)$ квадратную матрицу F простой струк-

туры к диагональной форме $\Lambda = \text{diag}[\lambda_i, i = \overline{1, n}]$ в силу соотношения

$$\Lambda = M^{-1}FM, \quad (21)$$

имеет своими столбцами собственные векторы матрицы F [6]. \square

Доказательство. Запишем базовое уравнение матричного подобия для рассматриваемого случая

$$M\Lambda = FM \quad (22)$$

в столбцовой форме

$$M[\Lambda_1 \ \Lambda_2 \ \dots \ \Lambda_i \ \dots \ \Lambda_n] = F[M_1 \ M_2 \ \dots \ M_i \ \dots \ M_n], \quad (23)$$

где Λ_i, M_i — i -е столбцы соответственно матриц Λ и M ($i = \overline{1, n}$). Перейдем теперь от матричного уравнения (22) к n векторно-матричным уравнениям вида

$$M\Lambda_i = FM_i; \quad i = \overline{1, n}, \quad (24)$$

где i -й столбец Λ_i диагональной матрицы Λ имеет представление

$$\Lambda_i = [0 \ \dots \ 0 \ \lambda_i \ 0 \ \dots \ 0]^T. \quad (25)$$

Нетрудно видеть, что с учетом (25) векторно-матричное уравнение (24) принимает вид

$$\lambda_i M_i = FM_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (26)$$

Векторно-матричное соотношение (26) является определением собственного вектора матрицы F , откуда следует, что M_i — собственный вектор матрицы F .

Положения утверждений 1—3 являются алгоритмической основой синтеза системы управления из условия обеспечения обобщенной синхронизированности многоканального динамического объекта.

Алгоритмы синтеза закона управления, обеспечивающего обобщенную синхронность динамическому объекту

Положения утверждений 1—3 с использованием концепции обобщенного модального управления позволяют предложить следующие алгоритмы.

Алгоритм 1,

основанный на положениях утверждения 1

1. Задание g_0 , определяющего $L_c\{g_0\}$ — линейную оболочку, натянутую на вектор g_0 , единичной размерности, которой в процессе функционирования ОУ должен принадлежать вектор выхода $y(t)$.

2. Формирование требования к показателям качества в переходном и установившемся режимах процессов, протекающих в подпространстве $L_c\{g_0\}$.

3. Формирование векторно-матричного представления технического объекта в форме (1).

4. Задание λ_{gl} и решение уравнения $K_g = \arg\{CBK_g = \lambda_{gl}I\}$.

5. Формирование собственного вектора матрицы F $\xi_i = BK_g g_0$.

6. Формирование модальной модели с матрицами Λ , H , образующими наблюдаемую пару, где диагональная матрица Λ является носителем желаемого спектра собственных значений матрицы F состояния проектируемой системы, в состав которого входит собственное значение λ_i , удовлетворяющее требованию

$$\lambda_i = \arg\{(\lambda_i I - A)\xi_i \in \text{Im}B\}, \quad (27)$$

где $\text{Im}B$ — образ матрицы B , т. е. пространство ее столбцов.

7. Формирование матричного уравнения Сильвестра $M\Lambda - AM = -BH$ в декомпозированной форме

$$[\tilde{M} : \bar{M}] \begin{bmatrix} \tilde{\Lambda} & 0 \\ 0 & \bar{\Lambda} \end{bmatrix} - A[\tilde{M} : \bar{M}] = -B[\tilde{H} : \bar{H}], \quad (28)$$

где в силу утверждения 3 $\tilde{M} = \xi_i$, $\tilde{\Lambda} = \lambda_i$: $F\xi_i = \lambda_i \xi_i$.

8. Выделение из системы (28) матричного уравнения Сильвестра

$$(\lambda_i I - A)\xi_i = -B\tilde{H} \quad (29)$$

и нахождение его решения относительно матрицы H , которое в случае $\text{rang}B = m = n = \dim x$ принимает вид

$\tilde{H} = B^{-1}(A - \lambda_i I)\xi_i$, а в случае $\text{rang}B = m < n$ находится из соотношения $\tilde{H} = (B^T B)^{-1} B^T (A - \lambda_i I)\xi_i$.

9. Выделение из системы (28) матричного уравнения Сильвестра

$$\bar{M}\bar{\Lambda} - A\bar{M} = -B\bar{H}, \quad (30)$$

в котором $(\bar{\Lambda}, \bar{H})$ — наблюдаемая пара, $\bar{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_j : j \neq i; j = \overline{1, n}\}$, и решение уравнения (30) при известных $\bar{\Lambda}$, A , B и \bar{H} относительно матрицы \bar{M} .

10. Формирование матриц $M = [\tilde{M} : \bar{M}]$ и $H = [\tilde{H} : \bar{H}]$, при этом обеспечив максимальную близость собственных векторов матрицы F $\xi_j = M_j$ ($j \neq i$) для модальной робастности системы к ортогональности с учетом возможной минимизации затрат на управление.

11. Вычисление матрицы K обратных связей с помощью соотношения

$$K = HM^{-1} = [\tilde{H} : \bar{H}][\tilde{M} : \bar{M}]^{-1}. \quad (31)$$

12. Построение закона управления в форме

$$u(t) = K_g g(t) - Kx(t) = K_g g(t) - K_y y(t) - K_x x(t) |_{K_y = K_g} = K_g (g(t) - y(t)) - K_x x(t) = K_g \varepsilon(t) - K_x x(t) |_{K_g = K_\varepsilon} = K_\varepsilon \varepsilon(t) - K_x x(t), \quad (32)$$

где $K_x = K - K_g C$.

Алгоритм 2,

основанный на положениях утверждения 2

1. Выполнение пп. 1—3 алгоритма 1.
2. Выполнение п. 4 алгоритма 1 при условии выполнения равенства $\lambda_{gl} = 1$.
3. Выполнение пп. 5—11 алгоритма 1.

Заключение

В заключение следует заметить, что класс решений поставленной задачи может быть расширен за счет использования алгебраических свойств левых собственных векторов матрицы F состояния системы (6), в качестве которых следует использовать строки C^k ($k = \overline{1, m}$) матрицы выхода $C = \text{col}\{C^k (k = \overline{1, m})\}$.

В этом случае передаточная матрица $C(sI - F)^{-1}BK_g$ имеет представление

$$C(sI - F)^{-1}BK_g = \text{col}\{C^k (k = \overline{1, m})\}(sI - F)^{-1}BK_g = \text{col}\{(s - \lambda_k)^{-1}C^k BK_g (k = \overline{1, m})\},$$

допускающее последующее развитие алгебраического подхода к решению задачи, описанного в статье применительно к правым собственным векторам.

Список литературы

1. Власенко В. А., Мирошник И. В., Сабинин Ю. А., Ушаков А. В. и др. Система управления лентопротяжным механизмом // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. 1977. Вып. 5/58.
2. Бочков А. Л., Дударенко Н. А., Ушаков А. В. Синтез многомерных функционально вырожденных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 1. С. 25—29.
3. Лаврентьев В. В., Ушаков А. В. К вопросу о синтезе перекрестных связей, обеспечивающих синхронную работу параллельно включенных агрегатов // Приборы и системы автоматизации. Тр. ЛИТМО. Вып. 85. Л.: ЛИТМО, 1975.
4. Мирошник И. В., Ушаков А. В. Синтез алгоритма синхронного управления системой квазиоднотипных объектов // Автоматика и телемеханика. 1977, № 11.
5. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1973.
7. Никифоров В. О., Ушаков А. В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002.
8. Ушаков А. В. Обобщенное модальное управление // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 3. С. 8—16.

УДК 681.518

Л. Б. Беленький, канд. техн. наук, науч. сотр.,
С. Ю. Боровик, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
А. В. Логвинов, вед. конструктор,
Б. К. Райков, ст. науч. сотр.,
Ю. Н. Секисов, д-р техн. наук, зав. лаб.,
О. П. Скобелев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
В. В. Тулупова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Институт проблем управления
сложными системами РАН, г. Самара,
iccs@iccs.ru

Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков.* Часть 2. Реализуемость методов

Рассматриваются вопросы реализуемости методов, описание которых приведено в части 1 статьи. Они связаны с топологией размещения чувствительных элементов датчиков относительно торцов лопаток и соотношением их размеров, а также с дифференциальными измерительными цепями, в которых смена функций датчиков обеспечивается применением бесконтактной коммутации с оценкой влияния остаточных параметров ключевых элементов на результаты преобразования.

Ключевые слова: компрессор и турбина, торцы лопаток, координаты смещений, методы получения информации, распределенный кластер одновитковых вихретоковых датчиков.

В первой части статьи [1] отмечалось, что на основе результатов преобразований сигналов датчиков, входящих в состав кластера, вычисляются изменения координат смещений путем решения систем уравнений, каждое из которых представляет собой семейство градуировочных характеристик (ГХ), причем это в равной степени относится как к сосредоточенному, так и распределенному по статору кластеру. Следует подчеркнуть, что система уравнений нелинейна, а ее решение осуществляется

* Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 4, 2009.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00422а).

численными методами. Необходимым условием сходимости итерационного процесса поиска решения системы является монотонность ГХ в диапазонах изменений координат и приемлемая чувствительность. Достаточным условием сходимости и разрешимости системы является независимость уравнений и существование ненулевого якобиана на каждой итерации численного решения [2].

Представляется очевидным, что перечисленные требования и условия связаны с конструктивными и физическими параметрами материала лопаток и их ориентацией относительно чувствительных элементов (ЧЭ), с геометрическими параметрами ЧЭ и топологией их размещения. Вместе с тем, топология размещения ЧЭ в кластерной композиции, рассмотренной в первой части статьи [1], равно как и в композициях, приведенных в работе [3], может оказаться несостоятельной для решения конкретных задач предлагаемым методом. И это связано с тем, что варианты размещения ЧЭ в указанных изображениях, как правило, существенно идеализированы и не отражают реальную асимметрию в размещении ЧЭ, смещения геометрических центров, соотношения в размерах торцевой части лопатки и длины ЧЭ, которые корректируются в процессе проектирования системы, реализующей предлагаемый метод, а идеализированные кластеры полезны лишь на начальной стадии проектирования. Процесс проектирования должен завершаться проверкой разрешимости и сходимости системы уравнений, полученной в результате вносимых в параметры идеализированного кластера изменений.

Поэтому в данной части статьи приводится пример кластера, отличающегося от идеализированного и обеспечивающего получение информации об изменениях трех координат смещений торцов лопаток при решении одной из задач экспериментальных исследований газотурбинных двигателей (ГТД).

Следует также отметить, что реализуемость предлагаемого метода связана и с разработкой измерительной цепи (ИЦ), обеспечивающей смену функций ЧЭ в составе кластера на предусмотренных этапах преобразования. Сохраняя преемственность с существующими ИЦ, предназначенными для одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД), вновь разработанные отличаются наличием коммутации, формирующей пары рабочих и ком-

пенсационных ЧЭ, а также импульсного питания, необходимого для работы ИЦ по методу первой производной [4]. Приводится описание таких ИЦ и рассматривается их функционирование во времени, а также анализируется возможность применения бесконтактных ключевых элементов и оценивается влияние их остаточных параметров на результат преобразования.

Коррекция в размещении ЧЭ в распределенном кластере с учетом конкретных исходных данных. Предполагается, что в ходе стендовых испытаний ГТД проводится исследование трех координат смещений торцов лопаток на ступени высокого давления компрессора при температуре 550 °С. Смещения вызваны упругими и термическими деформациями в направлениях осей X и Y , а также изгибом лопаток под действием тяговых усилий в направлении оси Z . Деформации имеют квазистатический характер, и их изменения на протяжении нескольких периодов вращения ротора (до 10) можно пренебречь. На статоре допускается не более трех установочных отверстий диаметром до 10 мм, равным диаметру тоководов существующих высокотемпературных датчиков [4]. Длина торца лопатки — 20 мм, высота — 35 мм. Предполагается также, что угловых смещений торцов лопаток в процессе испытаний не происходит, а диапазоны изменений остальных координат смещений (x , y , z) не превышают 1 мм.

Выбор вариантов топологии и размеров ЧЭ в процессе проектирования может быть осуществлен на основе анализа соответствующих им семейств ГХ, получение которых возможно экспериментальным путем или путем моделирования. Экспериментальные исследования трехмерных ГХ отличаются высокой трудоемкостью, поэтому более предпочтительным представляется второй путь: получение семейств ГХ с использованием либо численных моделей ЧЭ ОВТД на основе метода конечных элементов [5], либо упрощенных моделей [6—8]. Последние наиболее эффективны для снижения трудоемкости процесса проектирования, поскольку позволяют получить семейства ГХ в аналитическом виде, т. е. в виде формул [6—8] (в работах [7, 8], как и в настоящей статье, в отношении семейств ГХ, представленных в аналитическом виде, используется термин "семейства функций преобразования (ФП)").

Согласно [6—8] ЧЭ и лопатка заменяются электропроводными прямоугольными контурами с допущением, что параметры электромагнитного поля в пределах каждого контура не зависят от координат, а проводники, образующие контур, имеют ничтожно малый диаметр. По закону Био-Савара определяется индукция магнитного поля, которое создает

каждая из сторон контуров в окружающем пространстве, и магнитные потоки, связанные с контурами. Далее на основе второго закона Кирхгофа для всех контуров как электрических цепей с сосредоточенными параметрами составляется система уравнений, позволяющая (в рамках дополнительных упрощающих допущений) найти семейство ФП в виде зависимостей индуктивностей ЧЭ от координат смещений лопатки и заданных геометрических параметров.

В упрощенных аналитических моделях, разработанных применительно к кластерным ОВТД (КОВТД) с тремя ЧЭ в торцевой части датчика, т. е. фактически для сосредоточенных кластеров ОВТД (рис. 1, а), учитывается как электромагнитное взаимодействие контуров с ЧЭ с проходящим в зоне их размещения контуром лопатки, так и взаимодействие контуров ЧЭ между собой. Однако в распределенном кластере (рис. 1, б) расстояния между контурами более чем на порядок больше, и соответственно электромагнитное взаимодействие контуров ЧЭ между собой пренебрежимо мало, тем более с учетом разновременности фиксации кодов¹.

Это означает, что в распределенном кластере для получения семейств ФП ЧЭ можно использовать простейшую двухконтурную модель, в соответствии с которой характер изменения ФП определяется электромагнитным взаимодействием контура рабочего ЧЭ и контура лопатки [6].

На рис. 1, в слева представлены контуры одного из трех ЧЭ (ЧЭ₁) и лопатки. На обоих контурах показаны геометрические параметры — ширина (a_1 , a_2) и высота (b_1 , b_2) тоководов ЧЭ и лопатки соответственно.

Определяются индукция магнитного поля в обоих контурах, магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 , Φ_{12} , Φ_{21} и соответствующие потокам ЭДС в контурах. В предположении импульсного питания (E) контуров составляется система уравнений (система содержит два дифференциальных уравнения первого порядка, связывающих токи в контурах (i_1 , i_2) и их производные с параметрами контуров — сопротивлениями R_1 , R_2 , индуктивностями L_1 , L_2 и взаимными индуктивностями M_{12} , M_{21}). Контуры ЧЭ и лопатки в виде цепей с перечисленными параметрами также представлены на рис. 1, в (справа).

Поскольку для последующего преобразования индуктивности ЧЭ₁ в напряжение используется

¹ Следует отметить, что в парах контуров рабочего и компенсационного ЧЭ в моменты фиксации кодов токи протекают одновременно, но компенсационный ЧЭ в эти моменты находится между лопатками и электромагнитное взаимодействие с контурами ближайших лопаток (как и между собой) практически отсутствует.

метод первой производной [4], и информативным параметром является производная тока i_1 в момент $t = 0$ (момент подачи питания E), когда $i_1 = 0$, то информативный параметр определяется только напряжением E и индуктивностью ЧЭ₁, которая может быть выражена в виде разности индуктивности

L_1 и дроби $\frac{M_{12}M_{21}}{L_2}$, причем в [6] индуктивности L_1, L_2 и взаимоиנדуктивности M_{12}, M_{21} представлены в явном виде как функции размеров контуров, координат, определяющих положение контура и смещения лопатки в системе отсчета $OXYZ$.

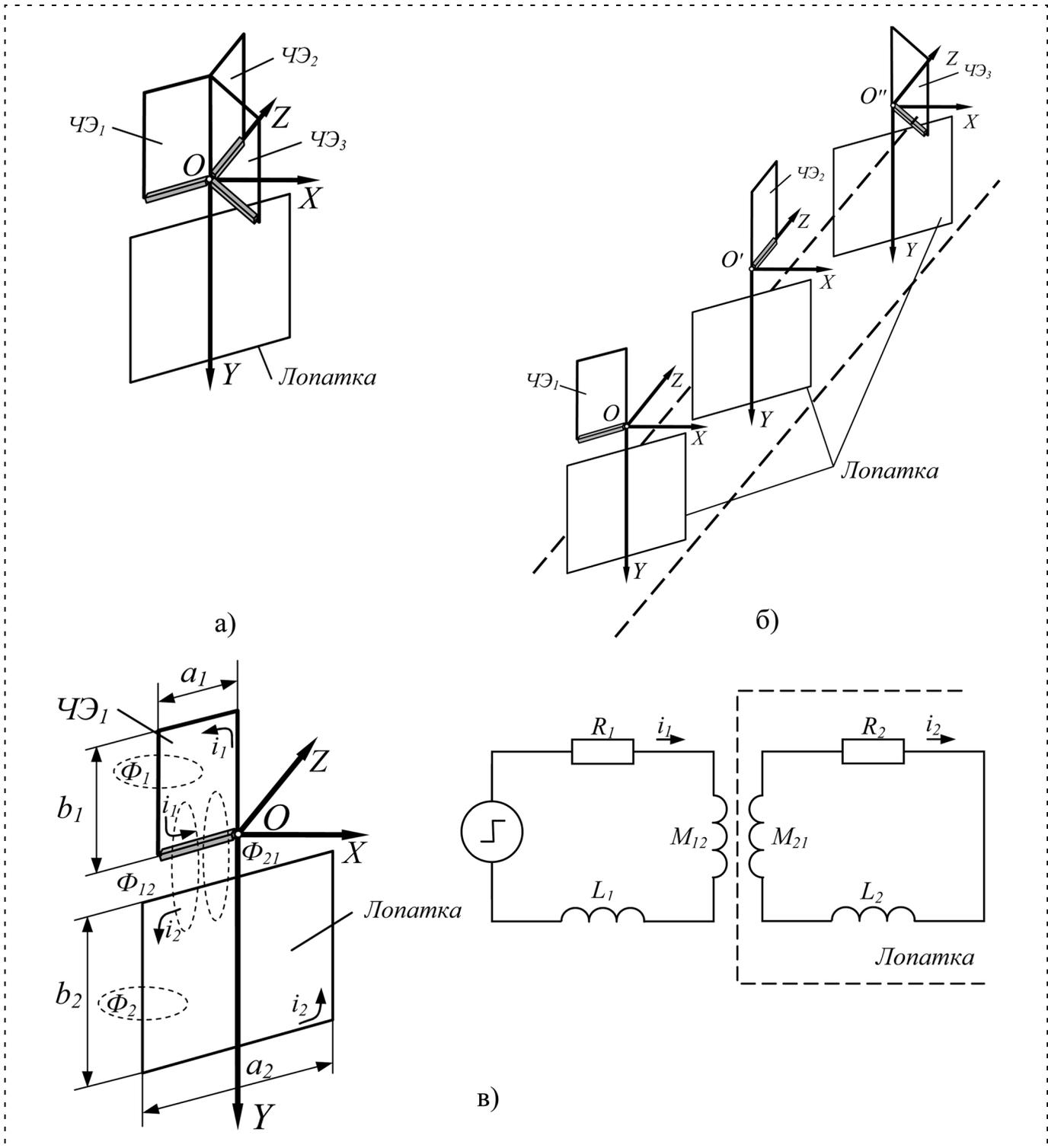


Рис. 1. Контурь сосредоточенного (а) и распределенного (б) кластеров ЧЭ и лопаток, электромагнитное взаимодействие ЧЭ с лопаткой и эквивалентная схема ЧЭ₁ (в)

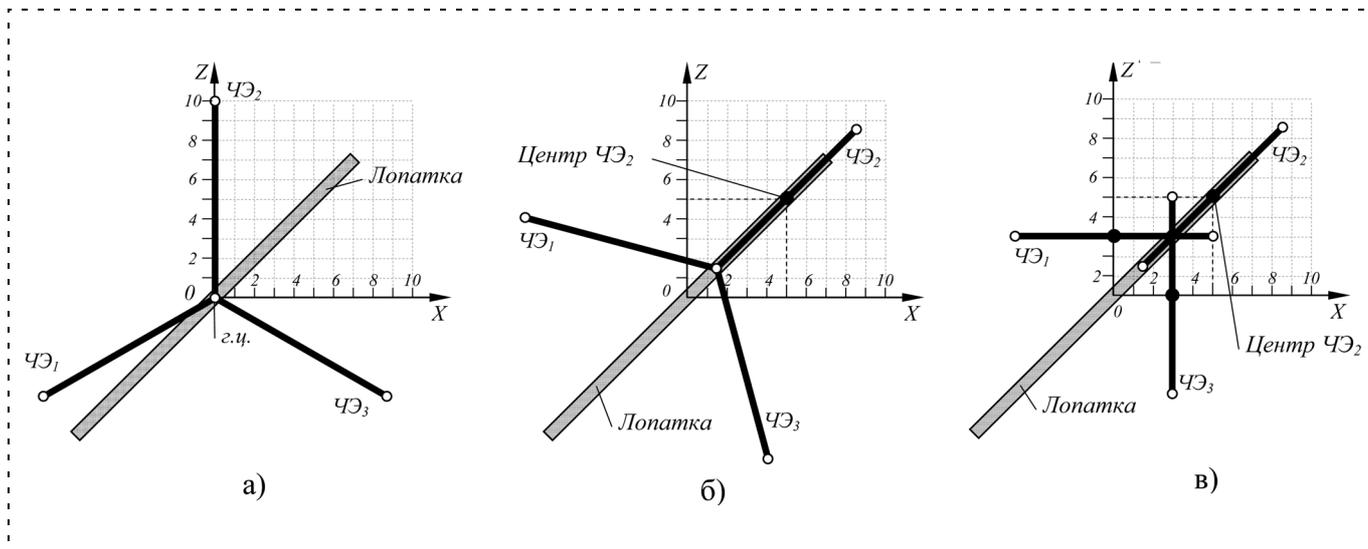


Рис. 2. Варианты размещения ЧЭ: в идеализированном кластере без смещений (а) и со смещением (б) его геометрического центра, в кластере со смещением ЧЭ₁ и ЧЭ₃ вдоль осей Z и X, соответственно (в)

Аналогичные формулы получены для ЧЭ₂ и ЧЭ₃, и все они образуют искомое семейство ФП².

Далее приводятся результаты анализа нескольких вариантов размещения ЧЭ в составе кластера, проведенного с помощью такой двухконтурной модели. При этом геометрические параметры обоих контуров выбраны в соответствии с приведенными выше исходными данными.

Как показали результаты анализа варианта размещения ЧЭ в идеализированном распределенном кластере [1], выбор рабочих диапазонов изменений координат X и Z, в которых все ФП монотонны, возможен только слева или справа от торца лопатки, поскольку ФП ЧЭ₂ имеет перегиб по торцу лопатки (биссектрисе угла между осями X и Z). В выбранной таким образом области только один из ЧЭ (ЧЭ₁) имеет достаточно высокую чувствительность к изменениям координат смещений (x, y, z). ЧЭ₂, установленный по отношению к торцу лопатки под углом 45°, имеет невысокую чувствительность, а ЧЭ₃ с углом установки к торцу лопатки, равным 75°, практически не чувствителен к изменениям координат (x, y, z). Кроме того, ЧЭ₁ и ЧЭ₂ имеют одинаковый характер изменения ФП в отношении координат x и z, что приводит к неразрешимости системы уравнений (нулевой или близкий к нулю якобиан на одной из итераций [2]).

Необходимо отметить, что в процессе анализа топологии распределенного кластера можно ис-

² Последующие преобразования индуктивности в напряжение и цифровой код рассматриваются ниже, причем связь цифрового кода на выходе ИЦ и изменений индуктивности в первом приближении можно считать линейной.

пользовать более компактные и удобные для восприятия изображения аналогичных по геометрическим параметрам и координатам размещения ЧЭ, но сосредоточенных кластеров (рис. 2)³.

Для устранения неразрешимости системы уравнений и повышения чувствительности к искомым координатам можно осуществить поворот всех ЧЭ на 45° так, чтобы торцевая часть ЧЭ₂ была ориентирована по торцу лопатки, и сместить центр ЧЭ₂ ближе к краю торца лопатки (например, координаты смещения центра ЧЭ₂ по осям X и Z составляют 5 мм, рис. 2, б). Однако и в этом варианте сохраняется неравномерность чувствительности к координатам ЧЭ. В рабочих диапазонах изменений координат x (от 1,5 до 3 мм), y и z (от 0 до 1,5 мм) все ФП монотонны, причем выполненные на модели исследования показали, что наибольшую чувствительность имеет ЧЭ₂, чувствительность ЧЭ₃ составляет 20 % от чувствительности ЧЭ₂, а чувствительность ЧЭ₁ — не более 1 %. Поэтому для практической реализации и этот вариант нежелателен.

Для повышения чувствительности ЧЭ₂ и ЧЭ₃ необходимо уменьшить угол между ними (тем самым уменьшить угол установки ЧЭ к торцу лопатки) и сблизить по возможности центры ЧЭ так, чтобы расстояние между ними не превышало 1/3...1/5 длины торца лопатки (рис. 2, в). При этом ЧЭ₂ ориентирован по торцу лопатки, а его центр смещен по осям X и Z на 5 мм, ЧЭ₁ смещен по оси Z на 3 мм, ЧЭ₃ — по оси X на 3 мм. Кроме того, ЧЭ₁ и ЧЭ₃ раз-

³ Рассмотренный вариант идеализированного кластера представлен на рис. 2, а.

вернуты так, что угол между ними равен 90° . В результате моделирования этого варианта определены семейства ФП для всех ЧЭ кластера ОВТД и получена чувствительность, достаточная для последующего преобразования в ИЦ. Семейства ФП использовались для проверки сходимости и разрешимости системы уравнений путем ее численного решения в каждой точке указанного рабочего диапазона изменений координат смещений. Приняты критерий

разрешимости — наличие решения системы уравнений (ненулевой якобиан на каждой итерации) и критерий сходимости — достижение заданной точности за заданное число итераций [2].

В результате проверки установлена область, соответствующая выбранным по этим критериям диапазонам изменений (рис. 3). Эта область невелика (рис. 3, д), поскольку ФП ЧЭ₂, как и в предыдущих вариантах, имеет перегиб по торцу лопатки. Кроме

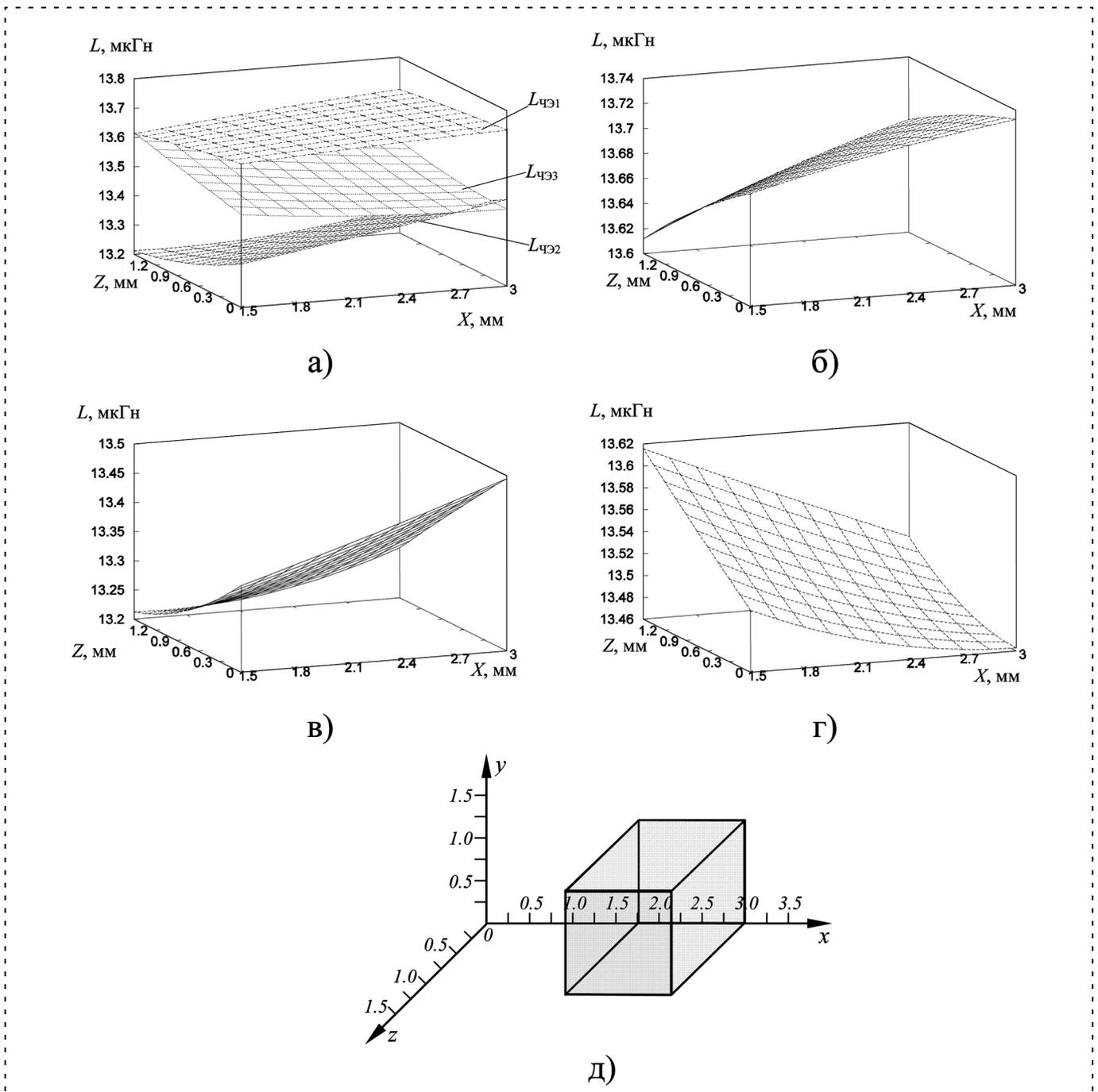


Рис. 3. Семейства ФП $L = f(x, y, z)$ для всех ЧЭ (а), а также ФП для ЧЭ₁ (б), ЧЭ₂ (в) и ЧЭ₃ (г) при $Y = 0.5$ мм, область рабочих диапазонов изменений координат (д)

того, ЧЭ₁ и ЧЭ₃ имеют пониженную чувствительность к координатам из-за их разворота относительно торца лопатки (для выбранных диапазонов в наибольшей степени это проявляется для ЧЭ₁).

В заключение следует заметить, что дальнейшее повышение чувствительности ЧЭ₁ и ЧЭ₃ возможно за счет их ориентации параллельно торцу лопатки (при этом достигается максимально возможная чувствительность к координатам). Эксперименты, проведенные на модели, показали, что такой вариант размещения при тех же геометрических параметрах ЧЭ и лопатки позволит увеличить рабочие диапазоны вдвое.

Пример измерительной цепи. Влияние остаточных параметров ключевых элементов. Как и в предыдущем подразделе, решается задача получения информации об изменениях трех координат смещения торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОБТД (ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃) методом, изложенным в первой части статьи [1]. Дифференциальная ИЦ, реализующая этот метод, представлена на рис. 4 и, в отличие от той, что приведена в работе [4], содержит ключевые элементы коммутатора. Ключи (К) обеспечивают образование пар рабочих и компенсационных датчиков в неравновесной мостовой

схеме, плечами которой являются обмотки согласующих трансформаторов (СТ) датчиков [4] и образцовые резисторы (R). Синхронное замыкание ключей в парах датчиков формирует также импульсное питание моста (амплитуда импульса соответствует напряжению E источника питания). При этом силы токов в апериодических контурах LR нарастают по экспоненциальному закону (рис. 4, б) и аналогично изменяются напряжения на резисторах R. Выходное напряжение моста (U_М), пропорциональное разности токов в контурах, дифференцируется с помощью дифференцирующего устройства (ДУ), а его максимальное значение (U_{ДУ max}) в момент появления импульса питания (t = 0) запоминается запоминающим устройством (ЗУ) и преобразуется в цифровой код (С) посредством АЦП.

На рис. 5 представлены временные диаграммы, иллюстрирующие функционирование ИЦ. Предполагается, что получению информации с кластера ОБТД предшествует измерение периода вращения колеса ротора компрессора (T_р) и его лопаточного венца. С этой целью используется датчик частоты вращения промышленного изготовления и метка (m) на валу ротора.

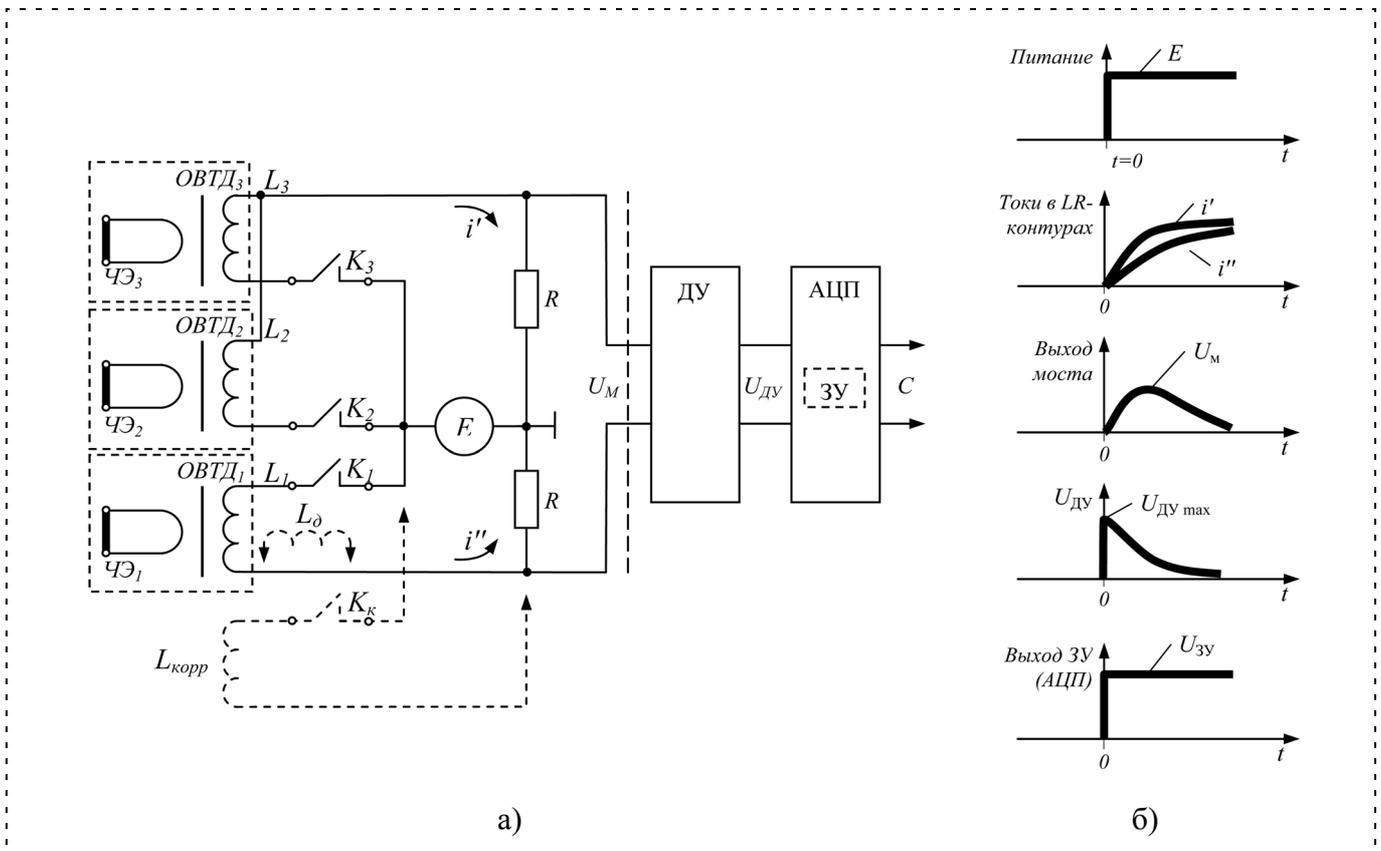


Рис. 4. Дифференциальная измерительная цепь: структурная схема (а) и временные диаграммы, поясняющие преобразование изменений индуктивности рабочего ОБТД в напряжение (б)

Найденные значения периода вращения T_p используются для вычисления моментов появления торцов лопаток в зонах действия электромагнитных полей ЧЭ распределенного кластера (рис. 5, эпюры 1–3) а также для определения временных параметров управления элементами ИЦ, в том числе периода тактовых импульсов ($T_0 = T_p/n$, где n — число лопаток), временных задержек (τ) и этапов функционирования ИЦ в соответствии с предлагаемым методом (рис. 5, эпюра 4). Следует отметить, что длительность задержек, предшествующих началу всех трех этапов, определяется моментами появления лопатки под номером 1 в зоне чувствительности рабочего ЧЭ на данном этапе. При этом каждый из трех этапов завершается после получе-

ния информации о координатах смещений торца последней лопатки (номер n), а длительность каждого этапа соответствует периоду вращения ротора ($nT_0 = T_p$).

Согласно предлагаемому методу на этапе 1 функционирует пара ЧЭ₁-Р и ЧЭ₂-К (см. первую часть статьи [1]). Поэтому на ключи K_1 и K_2 одновременно с тактовыми импульсами поступают импульсы управления, вызывающие замыкание ключей и соответственно подачу питания на мостовую схему (рис. 5, эпюры 5, 6). В результате аналоговых и аналого-цифровых преобразований (рис. 4, б) на выходе ИЦ формируются цифровые коды C_{1-1} , C_{1-2} , ..., C_{1-n} (первые цифры индексов — номера

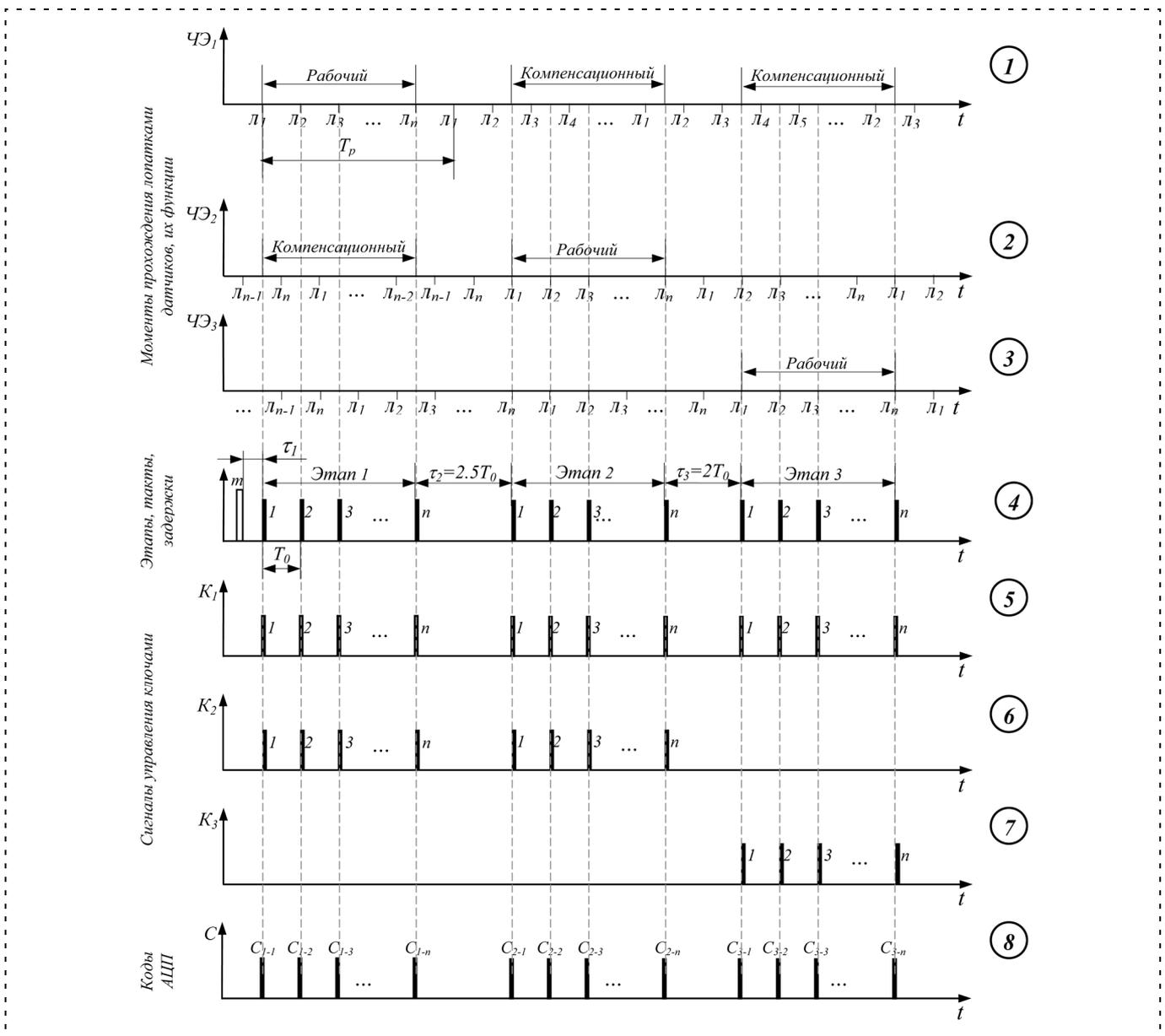


Рис. 5. Временные диаграммы, иллюстрирующие функционирование ИЦ

рабочих ЧЭ и этапов (в данном случае — 1, т. к. этап 1), вторые — номера лопаток).

Необходимо подчеркнуть, что на этапе 1 импульсы управления на ключ K_3 не поступают, и он разомкнут на протяжении всего этапа.

На этапе 2 функционирует та же пара ЧЭ, но их роли меняются на противоположные (ЧЭ_{2-Р} и ЧЭ_{1-К}). Благодаря задержке τ_2 импульсы управления появляются в момент прохождения лопатки 1 ЧЭ₂ (в этот момент ЧЭ₁ равноудален от лопаток и функционирует в качестве компенсационного, рис. 5, эпюры 5, 6). Синхронные замыкания ключей K_1, K_2 вызывают аналогичные последующие преобразования в ИЦ, которые завершаются формированием кодов C_{2-1}, C_{2-2}, \dots . Однако полярность напряжения на выходе моста (U_M) становится отрицательной, что необходимо учитывать при проектировании ДУ, ЗУ и АЦП. Вместе с тем, можно сохранить полярность U_M "искусственной асимметрией" путем ввода в плечо моста с ЧЭ₁ дополнительной катушки индуктивности (L_D), которая на рис. 4 показана пунктиром.

На этапе 3 функционирует другая пара ЧЭ, причем компенсационные функции в этой паре по-прежнему выполняет ЧЭ₁ (ЧЭ_{1-К}), а рабочим становится ЧЭ₃ (ЧЭ_{3-Р}). С задержкой τ_3 появляются импульсы управления в момент прохождения лопаткой 1 ЧЭ₃ (рис. 5, эпюры 5, 7). Синхронные за-

мыкания ключей K_1, K_2 вызывают соответствующие преобразования в ИЦ, которые завершаются формированием кодов C_{3-1}, C_{3-2}, \dots

На основе полученных значений кодов, а также ГХ (или ФП) составляется система уравнений (для каждой лопатки) и вычисляются искомые координаты смещений.

Таким образом, длительность получения информации о координатах смещения составляет около трех периодов вращения ротора ($\approx 3T_p$). При этом длительность преобразования индуктивностей ОВТД в амплитудное значение напряжения на выходе ДУ ($U_{ДУ}$) очень мала (доли мкс) и согласно проведенным исследованиям определяется влиянием паразитных параметров ОВТД, линий связи и ДУ [9, 10]. Поэтому представляется очевидной необходимость применения бесконтактных ключевых элементов, а также оценки влияния их остаточных параметров на выходной сигнал.

Как показали исследования дифференциальных ИЦ, работающих в импульсном режиме по методу первой производной [9, 10], важным условием снижения влияния паразитных параметров является симметрирование R, L, C -параметров плеч мостовой схемы с датчиками. Это в полной мере относится и к ИЦ (см. рис. 4, а), в которую в целях симметрирующей коррекции параллельно плечу с ЧЭ₁ через всегда разомкнутый ключ K_K , введена катуш-

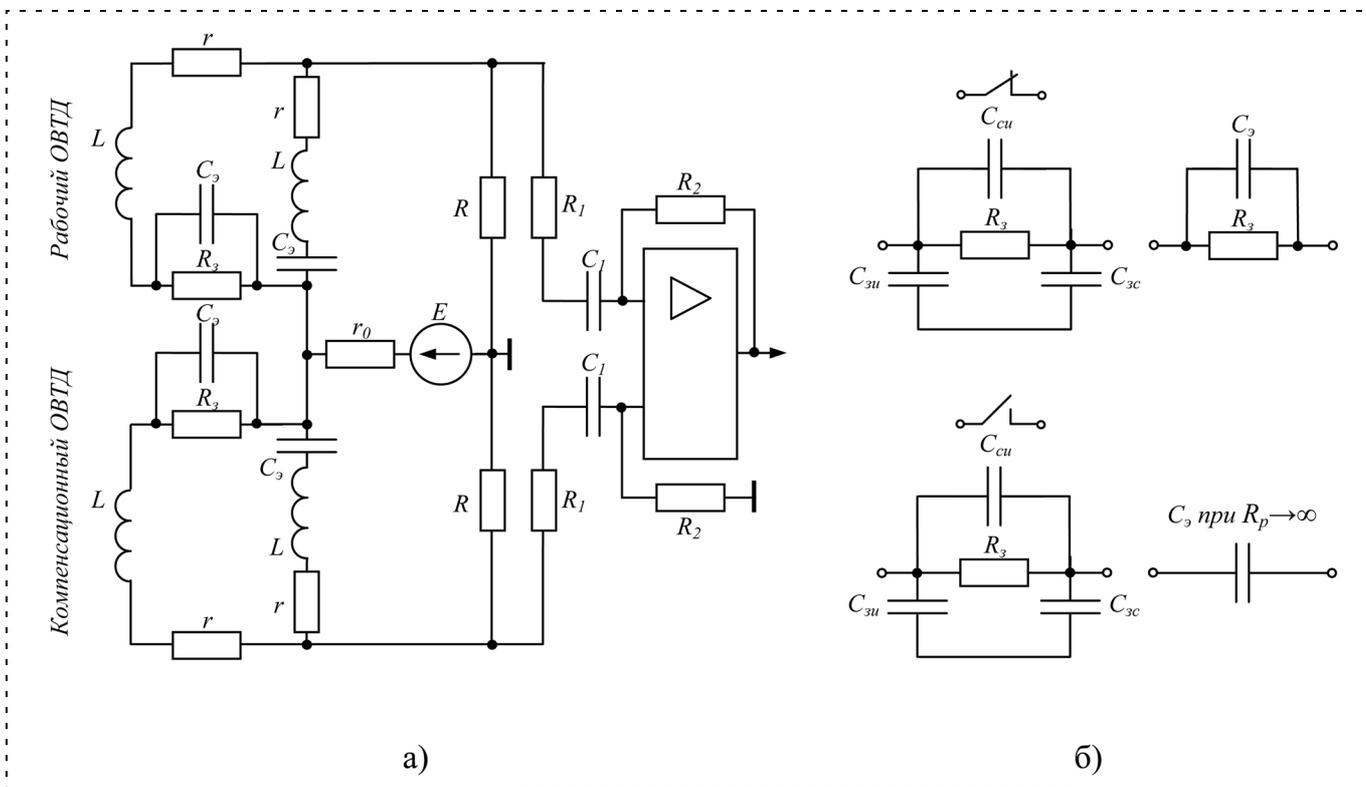


Рис. 6. Эквивалентная схема измерительной цепи (а) и бесконтактных ключей (б)

ка с индуктивностью $L_{\text{корр}}$, соответствующая индуктивности СТ датчика, не взаимодействующего с торцом лопатки (корректирующая цепь показана пунктиром).

Эквивалентная схема дифференциальной ИЦ для исследования влияния остаточных параметров бесконтактных ключей (униполярных транзисторов) изображена на рис. 6, а, где представлены эквивалентные параметры ОВТД и корректирующей катушки (L, r), источника питания (E, r_0), а также параметры ДУ — операционного усилителя (ОУ) в режиме дифференцирования. Остаточные параметры ключей в замкнутом состоянии определяются сопротивлением R_3 и эквивалентной емкостью C_3 , в разомкнутом — только емкостью C_3 (предполагается, что сопротивление в разомкнутом состоянии R_p очень велико ($R_p \rightarrow \infty$), и его влиянием можно пренебречь). Эквивалентная емкость определяется емкостью между стоком и истоком ($C_{\text{си}}$) и параллельной ей цепочкой из последовательно соединенных емкостей между стоком и затвором ($C_{\text{зс}}$) и истоком и затвором ($C_{\text{зи}}$) (рис. 6, б).

Моделирование эквивалентной схемы осуществлялось путем представления мостовой схемы в виде двух двусторонне нагруженных элементарных четырехполюсников, описываемых А-параметрами [11]. Один четырехполюсник содержит контур с рабочим ОВТД, второй — с компенсационным. Подобное представление позволяет получить передаточные функции обоих плеч LR -моста, мостовой схемы в целом и ИЦ, включающей передаточную функцию ДУ на основе ОУ. Все расчеты, связанные с определением выходного напряжения как функ-

ции времени для заданных параметров ИЦ, осуществлялись в среде MathCad.

В ходе исследований изучалось влияние остаточных параметров ключей на форму выходного напряжения ДУ ($U_{\text{ДУ}}$), его амплитудное значение (значение первого максимума при наличии колебательности), а также его смещение во времени от момента $t = 0$ (момента появления импульса питания моста). При этом предполагалось синхронное срабатывание ключей в плечах моста, а также идеальность ДУ ($R_1 = 0$, частота единичного усиления $f_i = \infty$ [12]) и влияние частоты f_i реально существующих ОУ. Кроме того, оценивалось влияние нестабильности остаточных параметров ключей из-за изменения температуры, определяющих метрологическую состоятельность реализационных возможностей метода, и влияние несинхронного срабатывания ключей из-за разброса длительности задержки в выбранных парах.

Как показывает анализ результатов моделирования в варианте идеальных ключей (синхронное срабатывание, $R_3 = 0, C_3 = 0$) и идеальности ДУ (рис. 7, а), переходные процессы в мостовой схеме имеют апериодический характер, равно как $U_{\text{ДУ}}(t)$ (кривая 1). Максимум $U_{\text{ДУ}}(t)$ наблюдается при $t = 0$. Емкости реальных ключей вносят заметную колебательность (кривая 2) при сохранении максимума $U_{\text{ДУ}}$ в момент времени $t = 0$.

Неидеальность ДУ и, в частности, уменьшение частоты f_i приводят к снижению максимума $U_{\text{ДУ}}$ и увеличению его смещения во времени: зависимости 3 и 4 получены при $f_i = 1500$ МГц и $f_i = 300$ МГц соответственно для ДУ в критическом режиме [13]

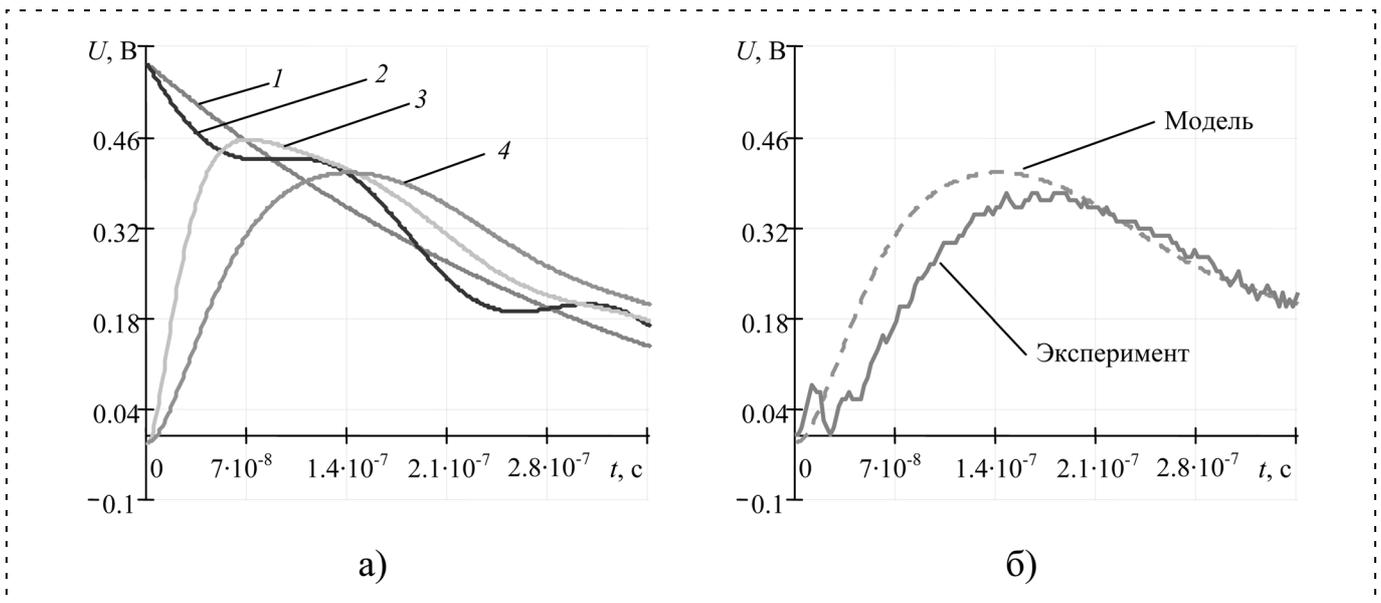


Рис. 7. Результаты моделирования (а) и натурального эксперимента (б)

и остаточных параметров реально существующих ключей⁴). При этом изменения максимальных значений $U_{\text{ДУ max}}$ в предположении идеальности ключей ($R_3 = 0$, $C_3 = 0$) не превышают 3,4 %. Однако реально изменения остаточных параметров существенно меньше (например, изменения R_3 составляют около 10 % при изменении температуры на 25 °С) и им соответствуют весьма незначительные изменения $U_{\text{ДУ max}}$ (на 0,022 % для ОУ с $f_t = 300$ МГц и на 0,015 % для ОУ с $f_t = 1500$ МГц).

В ходе исследований несинхронного срабатывания ключей из-за разброса в задержках выявлено резкое усиление колебательности $U_{\text{ДУ}}(t)$, которое, как показали натурные эксперименты, устраняется с помощью RC-цепочек в цепи управления ключами. На рис. 7, б представлены результаты эксперимента, где с помощью RC-цепочек устранено влияние разброса в задержках. Эксперимент проводился при тех же параметрах ИЦ, что и моделирование (частота $f_t = 300$ МГц). Для сравнения результатов на рис. 7, б представлена зависимость $U_{\text{ДУ}}(t)$, полученная путем моделирования (на рис. 7, а она обозначена цифрой 4). Высокочастотные колебания на экспериментальной зависимости $U_{\text{ДУ}}(t)$ объясняются неполной симметрией параметров плеч, которые не учитываются в модели. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента показывает расхождение $U_{\text{ДУ max}}$ и времени его смещения не более, чем на 20 %.

Заключение. Предложены новые методы получения измерительной информации о координатах смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах ГТД. В отличие от существующих предложенные методы предусматривают использование кластера высокотемпературных ОВТД с распределенным по статору ГТД размещением датчиков, последовательные во времени преобразования их индуктивностей со сменой функций датчиков с рабочих на компенсационные.

Проведен анализ реализуемости предложенных методов, связанной с топологией размещения ЧЭ датчиков относительно торцов лопаток и соотношением их размеров, а также с дифференциальными измерительными цепями, в которых смена функций ОВТД обеспечивается применением бесконтактной коммутации. На примере конкретной задачи экспериментальных исследований ГТД показана воз-

⁴ В процессе моделирования использовались параметры эквивалентной схемы $L = 20,5 \cdot 10^{-6}$ Гн, изменение $\Delta L = -0,5 \cdot 10^{-6}$ Гн (в рабочем ОВТД), $r = 0,1$ Ом, $R = 33$ Ом, $R_3 = 0,25$ Ом, $C_3 = 45 \cdot 10^{-12}$ Ф (для транзистора IRLML 2402), $C_1 = 680 \cdot 10^{-12}$ Ф, $R_2 = 3000$ Ом, $E = 7$ В, $r_0 = 0,1$ Ом. Приведенные значения f_t относятся к ОУ AD 8056 (300 МГц) и LMH 6552 (1500 МГц) [14, 15].

можность реализации метода — определена топология размещения ЧЭ, обеспечивающая получение искомой информации, разработан вариант дифференциальной ИЦ с ключами на униполярных транзисторах, исследовано влияние остаточных параметров ключей, результаты подтверждают состоятельность предложенных методов.

Список литературы

1. Бельский Л. Б., Боровик С. Ю., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 16–20.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977.
3. Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Обобщенное представление методов получения измерительной информации о координатах смещений торцов лопаток и лопастей // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2007. № 3. С. 19–24.
4. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю. Н., Скобелева О. П. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.
5. Боровик С. Ю., Маринина Ю. В., Секисов Ю. Н. Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2007. № 1(19). С. 76–83.
6. Тулупова В. В. Упрощенные аналитические модели взаимодействия чувствительных элементов кластерного одновиткового вихретокового датчика с торцами лопаток и лопастей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. VIII междунар. конференции (Самара, 24–29 июня 2006 г.). Самара: Самарский НЦ РАН, 2006. С. 246–252.
7. Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Тулупова В. В. Функции преобразования кластерного одновиткового вихретокового датчика // Автометрия. 2008. Т. 44. № 1. С. 47–58.
8. Бельский Л. Б., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Тулупова В. В. Функции преобразования кластерного одновиткового вихретокового датчика с тремя чувствительными элементами // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2008. № 1(21). С. 63–68.
9. Секисов Ю. Н., Хритин А. А. Исследование предельных возможностей метода первой производной для преобразования параметров высокотемпературных вихретоковых датчиков // Автоматизация научных исследований. Куйбышев: КуАИ, 1987. С. 154–160.
10. Бельский Л. Б. Системы измерения многомерных перемещений и деформаций элементов конструкций кривошипно-шатунного механизма в поршневых силовых установках: Автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Самара, 2003. 16 с.
11. Белецкий А. В. Теория линейных электрических цепей. М.: Радио и связь, 1986. 544 с.
12. Достал И. Операционные усилители: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 512 с.
13. Алексеев А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. Применение прецизионных аналоговых ИС. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
14. AD8056 DataSheet — Low Cost, Dual, 300 MHz Voltage Feedback Amplifiers [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.chipcatalog.com/analog/ad8056.html>, свободный. Яз. англ.
15. LMH6552 — 1.5 GHz Fully Differential Amplifier [Электронный ресурс] // National Semiconductor — Режим доступа: <http://www.national.com/pf/LM/LMH6552.html>, свободный. Яз. англ.

И. И. Дунин-Барковский, канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный технологический
университет СТАНКИН
igordbar@hotmail.com

Мехатронные системы для высокоточного трехмерного контроля размеров на основе активных систем технического зрения в современных технологиях

Рассматриваются проблемы применения систем трехмерного контроля размеров в современных технологиях электронного производства, таких как технология сборки печатных плат методом монтажа на поверхности, технология изготовления интегральных схем методом "перевернутого кристалла" и другие. Сформулированы требования по быстродействию, точности, разрешающей способности. Рассмотрены аспекты построения мехатронной системы для высокоточного трехмерного контроля размеров на основе активных систем технического зрения для использования в этих технологиях, представлена система контроля толщины (профиля) слоя олова для автоматической линии сборки печатных плат по методу монтажа на поверхности.

Ключевые слова: мехатронная система, система контроля, активная система технического зрения, технология сборки методом монтажа на поверхности, технология перевернутого кристалла.

Введение

В настоящее время наблюдается быстрое развитие технологий, направленных на создание более совершенных электронных устройств, обладающих улучшенными характеристиками и при этом являющихся более экономичными в плане производственных затрат. С этой точки зрения очень важным является повышение процента выхода годных изделий, что, в свою очередь, практически невозможно без широкого внедрения операций 100 %-го контроля на всех стадиях производства. Наиболее широкими возможностями обладает контроль с использованием систем технического зрения (СТЗ), которые позволяют получать и анализировать большой объем информации. Развитие элементной базы СТЗ позволяет автоматизировать очень широкий круг операций контроля и, что наиболее существенно, позволяет это делать в реальном масштабе времени технологического процесса и в бесконтактном режиме. Двумерные (2D) изображения, обрабатываемые и анализируемые с помощью СТЗ, содержат большой объем информации об объектах контроля, но он может быть существенно дополнен в случае наличия дополнительной информации о высоте, т. е.

при использовании так называемых 3D (трехмерных) СТЗ [1, 2].

Мехатронные системы контроля продукции электронного производства

Создание устройств автоматического 100 %-го контроля электронных изделий, удовлетворяющих подобным требованиям, является сложной научно-технической проблемой. Она сочетает вопросы обеспечения высокоскоростного и высокоточного сканирования объектов по двум или трем осям, что является типичным для мехатроники, с проблемами обработки визуальной информации, обеспечивающей получение информации о трехмерном профиле объекта контроля в реальном масштабе времени.

Подобные системы являются одной из перспективных областей применения мехатронных систем, рассматривающих механические, управляющие и информационные компоненты в едином комплексе [3].

Основными тенденциями, существенно влияющими на использование СТЗ в современных системах контроля, являются следующие:

- уменьшение размеров контролируемых объектов (до 50...100 мкм);
- увеличение числа контактов (до 1000...2000);
- сокращение производственных циклов, повышение требований по производительности (до 20...30 с на цикл).
Это приводит к тому, что:
- увеличиваются требования к разрешающей способности систем в плоскости изображения (до 20, 10, 5 мкм);
- повышаются требования к разрешающей способности систем по высоте (до 0,1 мкм);
- увеличивается размер изображений, измеренный в элементах изображения (пикселях);
- увеличивается требуемый размер памяти для хранения изображений (до сотен мегабайт — единиц гигабайт);
- повышаются требования к скорости обработки и анализа изображений.

Автоматический 3D-контроль в основных современных технологиях электронного производства

В современном электронном производстве большинство печатных плат собираются методом монтажа на поверхности (SMT).

На рис. 1 показана автоматическая линия сборки печатных плат методом SMT, которая обычно включает в себя следующие устройства: магазин за-

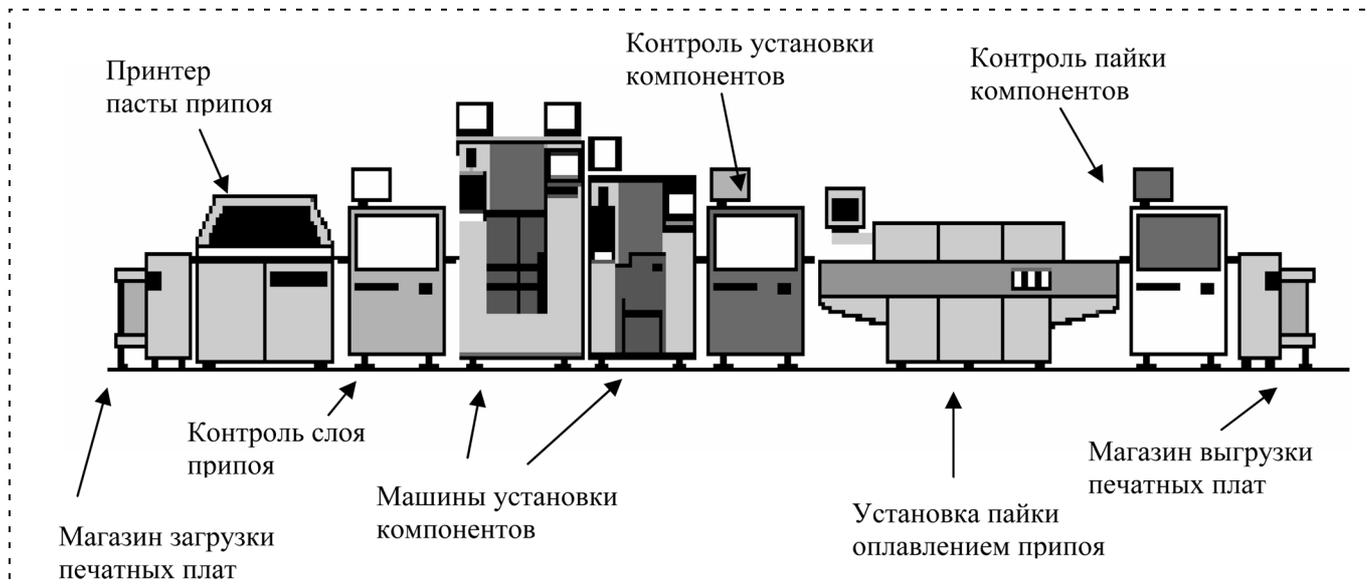


Рис. 1. Производственная линия SMT-технологии

грузки печатных плат, принтер пасты припоя, машины установки электронных компонентов, установку (печь) пайки оплавлением припоя, магазин выгрузки печатных плат, а также системы визуального контроля качества. Линия работает следующим образом. Пустые печатные платы поступают из магазина загрузки и подаются в принтер пасты припоя, который наносит слой пасты толщиной обычно 100...200 мкм на места печатной платы, предназначенные для пайки выводов электронных компонентов, размеры которых составляют от нескольких сотен микрон до единиц миллиметров. Затем выполняется визуальный 3D-контроль нанесенной пасты, и признанные годными платы поступают в машины установки компонентов. Этих машин обычно бывает несколько в одной линии, они устанавливают интегральные схемы, конденсаторы, ре-

зисторы и другие электронные компоненты на соответствующие места на печатной плате. После их установки осуществляется контроль правильности установки.

Еще одной современной технологией, широко используемой в современном электронном производстве, является технология изготовления интегральных схем методом "перевернутого кристалла" (flip chip, FC). Эта технология все чаще используется при изготовлении интегральных схем большой степени интеграции, имеющих также большое число выводов, прежде всего таких, как центральные процессорные элементы (CPU), устройства программируемой логики (FPGA, CPLD), а в последнее время также схемы запоминающих устройств. При этом полупроводниковый кристалл устанавливается на подложке, которая является миниатюрной печатной платой, в перевернутом виде, и электрический контакт между кристаллом и подложкой осуществляется с помощью миниатюрных шаровых контактов припоя, аналогично тому, как осуществляется контакт между самой интегральной схемой и печатной платой (рис. 2). И возможно, наиболее высокие требования к системе визуального контроля предъявляет технология изготовления электронных схем на кристалле полупроводника. В этой тех-

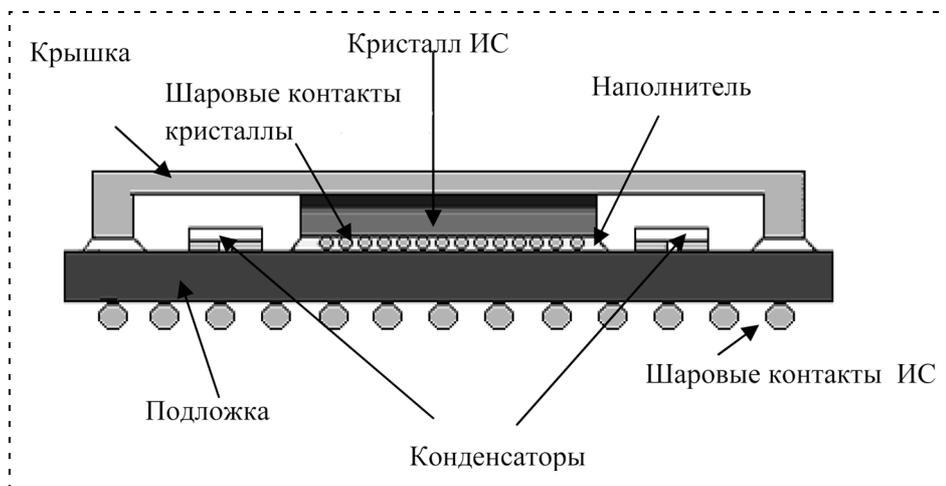


Рис. 2. Структура флип-чип (FC) корпуса

нологии изготовления электронных схем на кристалле полупроводника. В этой тех-

Требования к системам автоматического визуального контроля

Технология	SMT	FC	Кристалл
Максимальный размер области контроля, мм	510 × 460	40 × 40	Диаметр 300
Минимальный размер объекта контроля, мкм	200	50	40
Разрешение по x, y , мкм	15–20	5–10	5–8
Число точек, млн	500–1000	16–64	1000–3000
Время цикла, с	20–40	1–2	50–100
Быстродействие, см ² /с (млн точек/с)	40–120 (25–50)	4–8 (16–32)	7–14 (20–30)
Разрешение по z , мкм	1	0,2	0,1

нологии контроль на основе СТЗ начинают использовать все шире и шире, причем все большее значение приобретает контроль, использующий 3D-возможности наряду с традиционными 2D-возможностями.

В таблице показаны основные требования, предъявляемые рассмотренными выше современными технологиями электронного производства к системам автоматического визуального контроля дефектов.

Как видно из таблицы, современные электронные технологии предъявляют к устройствам контроля размеров очень жесткие требования по производительности и разрешающей способности.

Для обеспечения высокоточного и высокоскоростного сканирования по двум осям используются оси линейного перемещения на основе линейных моторов, оснащенные высокоточными датчиками линейного перемещения. При этом ось X , обеспечивающая основное рабочее сканирование, перемещает измерительную головку, а ось Y перемещает объект контроля (печатную плату) в перпендикулярном направлении. Структура мехатронной

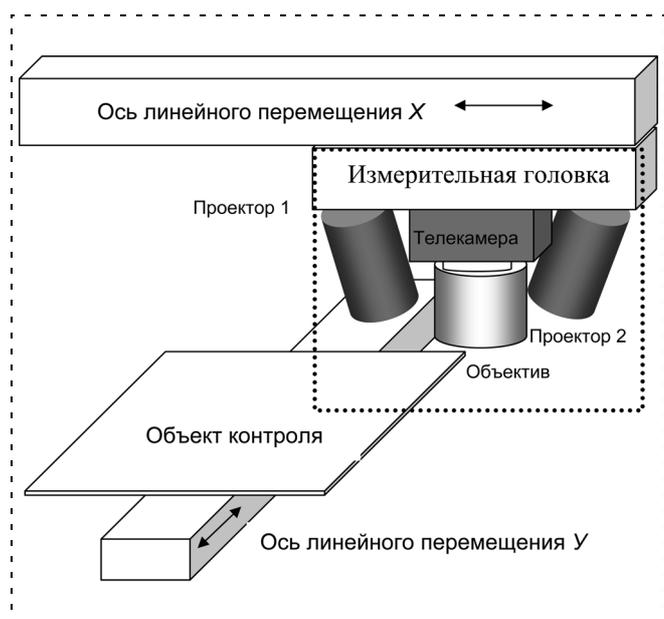


Рис. 3. Структура мехатронной системы

системы трехмерного контроля печатных плат представлена на рис. 3.

Здесь показаны оси линейных перемещений X и Y и измерительная головка, содержащая телевизионную камеру с объективом и два проектора структурированного освещения. Контроллер оси линейного перемещения X обеспечивает также сигнал строчной синхронизации телекамеры, обеспечивающий построчный ввод изображения.

Активные СТЗ в мехатронных системах контроля

Для получения трехмерной и двумерной информации о контролируемом объекте используется измерительная головка, построенная на основе активной СТЗ. Принцип действия активных СТЗ основан на облучении поверхности объекта и анализе информации, содержащейся в отраженном излучении.

Основными отличительными свойствами измерительной головки, построенной на основе активной СТЗ, являются следующие:

- наличие источника излучения;
- излучение неоднородно, т. е. обладает различными свойствами в различных направлениях;
- объект отражает существенную часть излучения в направлении приемника изображения;
- часто используется триангуляционный принцип, для которого также важно наличие угла между направлениями от проектора и к приемнику изображения.

Наиболее приемлемым является использование источников электромагнитного излучения, причем возможны различные варианты:

- видимое излучение (длина волны 380–770 нм). Основные достоинства — широкий выбор источников и приемников изображения;
- ближнее инфракрасное ИК-излучение (длина волны 770–1400 нм). Достоинства — максимальная чувствительность полупроводниковых приемников изображения;
- ближнее ультрафиолетовое УФ-излучение (длина волны 300...380 нм);
- гамма-излучение (длина волны < 100 нм).

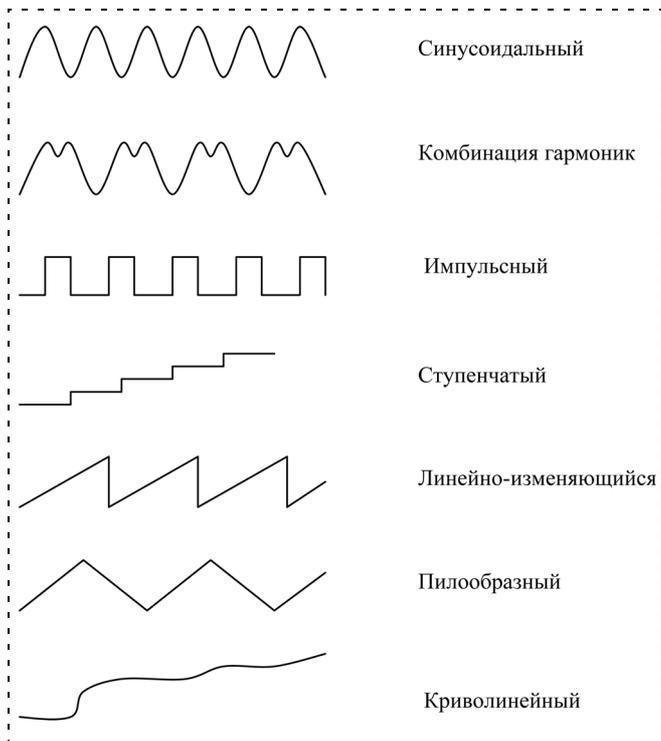


Рис. 4. Законы изменения свойств проецируемого излучения

В качестве характеристики излучения, изменяющейся в зависимости от направления, могут быть выбраны следующие: интенсивность, длина волны, поляризация, фазовый сдвиг.

Законы изменения играют важную роль, так как от них зависит выбор методов измерения изменений вышеуказанных характеристик в зависимости от направлений и расстояний.

Эти законы могут быть следующими (рис. 4):

- гармонический. Может использоваться синусоидальный закон (одна гармоника) или комбинация нескольких гармоник;
- импульсный. Как разновидность может использоваться ступенчатый закон изменения;
- линейно-изменяющийся. Разновидность — пилообразный закон изменения;
- криволинейный закон изменения.

Структурная схема активной СТЗ представлена на рис. 5. Работает система следующим образом. Излучение от источника проходит через проектор, приобретает определенную структуру и проецируется на поверхность объекта. Отраженное от поверхности объекта излучение фокусируется с помощью оптической системы на приемнике изображения, в котором оно преобразуется в электрический сигнал, затем переводится в цифровую форму и анализируется в виде 2D- и 3D-изображений.

Наиболее популярным и удобным для использования является синусоидальный закон изменения,

при котором интенсивность сигнала, воспринимаемого приемником изображения в точке k , может быть определена как

$$b_k = \frac{R}{(1+m)} [1 + a_1 \cos(\varphi - \theta_k)];$$

$$\varphi = 2\pi \text{tg} \alpha \frac{z}{P_e},$$
(1)

где R характеризует отражательную способность поверхности объекта; m — контраст; z — координата по вертикали; α — угол проецирования; P_e — эффективный период решетки проектора; θ — начальный угол фазы; a_1 — основная гармоника.

Для того чтобы упростить решение системы уравнений, состоящей из уравнений типа (1) для нескольких точек, обычно точки выбирают на одинаковом расстоянии друг от друга ($\theta_k = k\theta$) и используют 3, 4 или 5 точек. Например, для случая трех точек со сдвигом 90° мы получим: $\theta_0 = 0$, $\theta_1 = 90^\circ$ и $\theta_2 = 180^\circ$, результат для фазового сдвига получится в виде

$$\varphi = \text{arctg} \frac{2b_1 - b_0 - b_2}{b_0 - b_2}.$$
(2)

Для случая четырех точек и угла $\theta = 120^\circ$ из (2) можно получить

$$\varphi = \text{arctg} \frac{2(b_1 - b_{-1})}{b_0 - b_2}.$$
(3)

Наконец, для случая пяти точек и угла $\theta = 120^\circ$ получаем:

$$\varphi = \text{arctg} \frac{2(b_1 - b_{-1})}{2b_0 - b_2 - b_{-2}}.$$
(4)

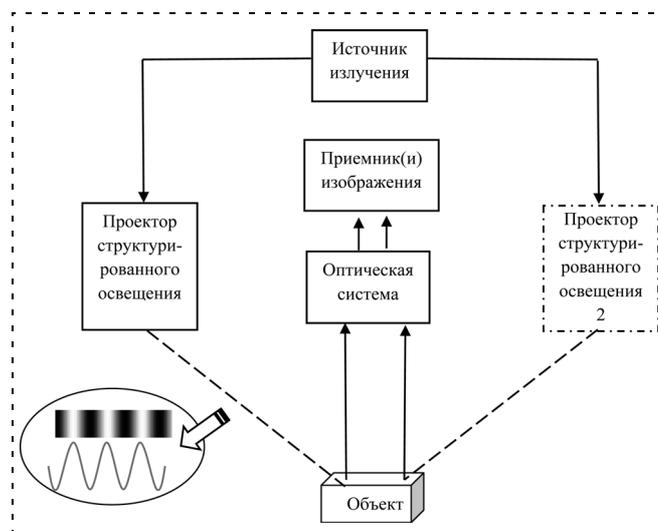


Рис. 5. Структура активной СТЗ

Заключение

Описанный подход положен в основу системы контроля толщины (профиля) слоя олова XR1-4000L для автоматической линии производства печатных плат по SMT-технологии южнокорейской фирмой "Синапс Имиджинг" (рис. 6, см. третью сторону обложки).

Система обладает следующими характеристиками:

Разрешение, мкм	20 в горизонтальной плоскости 0,1 — по вертикали
Размер объекта контроля (печатной платы), мм	до 510 × 460
Рабочий диапазон по высоте, мкм	6000
Погрешность измерения высоты, мкм	<3
Скорость сканирования и обработки информации, см ² /с.	>40

Это позволило использовать измерительную систему для 100 %-го контроля печатных плат в составе современных автоматических линий. Основными объектами контроля являются бугорки припоя на печатных платах, предназначенные для установки электронных компонентов (интегральных схем, конденсаторов, резисторов и т. д.). Трехмерное изображение подобного бугорка и его основные

параметры показаны на рис. 7 (см. третью сторону обложки). Система позволяет контролировать высоту припоя, объем, площадь, а также выявлять целый ряд специфических дефектов.

В данной системе успешно решены проблемы обеспечения высокой точности измерения трехмерного профиля для систем, работающих по принципу активных СТЗ на основе измерения фазового сдвига при синусоидальном законе изменения освещенности [4, 5].

Список литературы

1. Guerra E., Villalobos J. R. A three-dimensional automated visual inspection system for SMT assembly // Computers & Industrial Engineering. 2001. Vol. 40. P. 175—190.
2. Дунин-Барковский И. И. Трехмерный контроль изделий электронной промышленности с использованием средств технического зрения // Измерительная техника. 2006.
3. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
4. Dunin-Barkowski I., Kim J. S. Accuracy problems in phase shift based 3D machine vision inspection systems // Proc. of SPIE. 2006. Volume 6049. Optomechatronic machine vision. P. 6049P1—7.
5. Dunin-Barkowski I., Kim J. S. Influence of the projected grid pattern distortions on measurement accuracy for phase shift based 3D inspection // Proc. of SPIE — Volume 6051. Optomechatronic Machine Vision, Kazuhiko Sumi, Editor. 2005. P. 63820F. 1—7.

ИНФОРМАЦИЯ

28 сентября—4 октября 2009 г.

в пос. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края
в рамках Международной научно-технической мультikonференции

"Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники" (ИКТМР-2009)

состоится локальная научно-техническая конференция

"ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ" (ИИ-2009)

Председатели: акад. РАН С. В. Васильев
чл.-корр. НАНУ А. И. Шевченко

Направления работы конференции

- ◆ Концептуальные проблемы создания систем искусственного интеллекта
- ◆ Интеллектуальный анализ данных
- ◆ Системы принятия решений, планирования и моделирования
- ◆ Компьютеризация естественно-языковых текстов и семантический поиск
- ◆ Интеллектуальные системы автоматизации научных исследований, проектирования и управления
- ◆ Обучающие и экспертные системы
- ◆ Прикладные интеллектуальные системы

Подробную информацию о мультikonференции ИКТМР-2009 и локальной конференции ИИ-2009 см. на сайте <http://www.mvs.tsure.ru>

УДК 629.3.052

К. Б. Алексеев, д-р техн. наук, проф.,
А. А. Малявин, аспирант,
К. А. Палагута, канд. техн. наук, доц.,
 Московский государственный
 индустриальный университет
 palaguta@msiu.ru

Сравнительный анализ предикторного и нечеткого управления движением автомобиля

Исследуется построение автоматической системы рулевого управления движением автомобиля на основе нечеткой логики и проводится сравнение с аналогичной системой предикторного управления.

Ключевые слова: водитель, нечеткое управление, предикторное управление, управление с предсказанием, управление с прогнозированием, математическая модель, схема конструкции, параметры, движение, дорожное движение.

В процессе движения водитель получает и обрабатывает большие объемы различной информации. Быстро меняющаяся дорожная обстановка требует от водителя оперативного принятия решений по управлению транспортным средством. В связи с ростом интенсивности движения водителю становится затруднительно обеспечивать управление автомобилем, полностью исключая возможность дорожных происшествий. Поэтому возникает необходимость в автоматизации процесса вождения, позволяющей совместно с водителем повысить безопасность движения. Это предполагает разработку системы рулевого управления автомобилем, оставляющей за водителем функцию принятия стратегических решений и возможность ручного управления. Такой подход, как показывает зарубежный опыт, позволяет облегчить решение проблемы безопасности.

В данной статье рассматриваются два типа таких систем: с предикторным управлением (т. е. с предсказанием) и управлением на основе нечеткой логики, а также проводится их сравнение с точки зрения качества управления.

Модель движения автомобиля

Принято различать два основных вида движения автомобиля: прямолинейное и криволинейное.

В первом случае происходит только изменение скорости движения, а рулевое управление не задействовано. Поэтому наибольший интерес представляет криволинейное движение, поскольку именно оно непосредственно связано с рулевым управлением.

Конструктивная схема для данной модели представлена на рис. 1. Поскольку предполагается, что колеса каждого моста автомобиля имеют одинаковые характеристики, а углы поворота управляемых колес одинаковы, они могут быть заменены одним условным колесом для каждого моста, имеющим соответствующие суммарные характеристики (коэффициент сопротивления боковому уводу, коэффициент сопротивления качению).

Математическую модель в этом случае [5] можно представить системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} m_a \frac{dv_x}{dt} &= \frac{1}{\delta_{п.м}} \left(\frac{M_d u_{тр} \eta_{тр}}{r_k} - F_a - F_w - F_{крив} \right); \\ m_a \frac{dv_y}{dt} &= - \frac{k_{yв1} + k_{yв2}}{v_x} v_y - \\ &- \left(\frac{k_{yв1} l_1 + k_{yв2} l_2}{v_x} + v_x \right) \omega_z + k_{yв1} \theta; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} &= - \frac{k_{yв1} l_1 + k_{yв2} l_2}{v_x} v_y - \\ &- \frac{k_{yв1} l_1^2 - k_{yв2} l_2^2}{v_x} \omega_z + k_{yв1} l_1 \theta, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где m_a — масса автомобиля; v_x — скорость движения центра масс автомобиля относительно оси x ; $\delta_{п.м}$ — коэффициент приведения массы автомобиля к валу двигателя; M_d — крутящий момент двигателя;

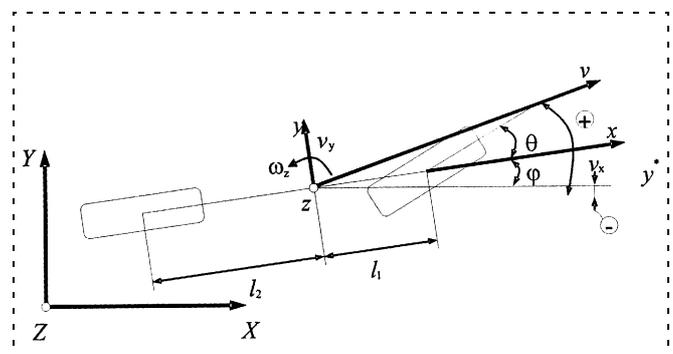


Рис. 1. Двухколесная модель автомобиля

$u_{\text{тр}}$ — передаточный коэффициент трансмиссии; $\eta_{\text{тр}}$ — КПД трансмиссии; $r_{\text{к}}$ — радиус качения колеса; g — ускорение свободного падения; $F_{\text{а}}$ — сила сопротивления качению; $F_{\text{в}}$ — сила аэродинамического сопротивления воздуха; $F_{\text{крив}}$ — сила сопротивления криволинейному движению; v_y — скорость движения центра масс относительно оси y ; $k_{\text{уб1}}$ — коэффициент сопротивления боковому уводу переднего моста; $k_{\text{уб2}}$ — коэффициент сопротивления боковому уводу заднего моста; l_1 — расстояние от центра масс до переднего моста; l_2 — расстояние от центра масс до заднего моста; ω_z — скорость вращения автомобиля относительно оси z ; θ — угол поворота передних колес; J_z — момент инерции автомобиля относительно оси z .

Управление траекторией движения автомобиля осуществляется за счет изменения угла поворота θ передних колес.

Для того чтобы привести массу автомобиля к валу двигателя, необходимо умножить ее на коэффициент, определяемый по следующей формуле:

$$\delta_{\text{п.м}} = 1 + \frac{J_{\text{д}} u_{\text{тр}}^2 \eta_{\text{тр}} + J_{\text{тр}} + J_{\text{к.в}} + J_{\text{к.н}}}{r_{\text{к}}^2 m_{\text{а}}},$$

где $J_{\text{д}}$ — момент инерции двигателя; $J_{\text{тр}}$ — момент инерции трансмиссии; $J_{\text{к.в}}$ — момент инерции ведущих колес; $J_{\text{к.н}}$ — момент инерции ведомых колес.

Далее предполагается, что автомобиль движется по ровной твердой дороге, а силы аэродинамического сопротивления отсутствуют.

Сила сопротивления качению складывается из силы сопротивления переднего и заднего мостов автомобиля:

$$F_{\text{а}} = \frac{m_{\text{а}} g}{L} (l_1 f_{\text{а1}} + l_2 f_{\text{а2}}), \quad (2)$$

где L — длина автомобиля, от переднего до заднего моста; $f_{\text{а1}}$ — коэффициент сопротивления качению переднего моста; $f_{\text{а2}}$ — коэффициент сопротивления качению заднего моста.

Сила сопротивления криволинейному движению:

$$F_{\text{крив}} = R_{y1} \theta - \delta_{\text{п.м}} m_{\text{а}} v_y \omega_z,$$

где R_{y1} — поперечная сила реакции дороги.

При движении с различной скоростью коэффициент сопротивления качению изменяется. В качестве зависимости, позволяющей учесть данное изменение, используем выражение

$$f_v = f_0 (1 + (0,0216v)^2),$$

где v — скорость движения колес автомобиля в направлении качения; f_0 — коэффициент сопротивления качению колеса при движении автомобиля с малой скоростью.

В процессе движения деформация шин в боковом и радиальном направлениях, обусловленная уводом автомобиля, приводит к увеличению силы сопротивления качению. В этом случае коэффициент сопротивления i -го моста автомобиля (с двумя колесами) можно вычислить по формуле [5]

$$f_{\text{а}i} = 2 \left(f^* + \frac{k_{\text{уб}i} \delta_{\text{уб}i}}{R_{zi}} \right),$$

где f^* — коэффициент сопротивления качению колеса при движении по прямой; R_{zi} — сила реакции дороги для i -го моста автомобиля; $k_{\text{уб}i}$ — коэффициент сопротивления уводу i -го моста; $\delta_{\text{уб}i}$ — угол увода колес i -го моста.

При приложении к ведущему мосту тягового момента коэффициент сопротивления уводу ведущих колес $k_{\text{уб2}}$ уменьшается. Его приближенное значение может быть вычислено по формуле [5, 6]

$$k_{\text{уб2}} = k_{\text{уб1}} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R_{x2}}{\varphi_x R_{z2}} \right)^2}}{1 + 0,375 \frac{R_{x2}}{R_{z2}}}, \quad (3)$$

где R_{x2} — продольная реакция колес ведущего моста; φ_x — коэффициент сцепления с дорогой; R_{z2} — сила реакции дороги для ведущего моста.

Формула (3) действительна при $\sqrt{R_{x2}^2 + R_{y2}^2} \leq 0,5 \varphi_x R_{z2}$, что означает отсутствие проскальзывания колес и заноса автомобиля.

Тогда боковые реакции, действующие на передний и задний мосты автомобиля, равны

$$R_{yi} = k_{\text{уб}i} \delta_{\text{уб}i},$$

где $k_{\text{уб}i}$ — коэффициент сопротивления уводу i -го моста; $\delta_{\text{уб}i}$ — угол увода i -го моста.

Углы увода колес переднего и заднего мостов приближенно можно выразить через текущие значения параметров движения автомобиля:

$$\begin{cases} \delta_{\text{уб1}} = \theta - \frac{l_1 \omega_z + v_y}{v_x}; \\ \delta_{\text{уб2}} = \frac{l_2 \omega_z - v_y}{v_x}. \end{cases}$$

Исходные данные

При моделировании систем управления использовались следующие константы, описывающие конструктивные и динамические особенности автомобиля:

Масса, кг	1269
Длина, м.	2,4658
Расстояние от центра масс до переднего моста, м	1,103
Момент инерции относительно центра масс, кг · м ²	1200
Момент инерции двигателя, кг · м ²	0,55
Момент инерции трансмиссии, кг · м ²	0,6
Момент инерции переднего моста, кг · м ²	1
Момент инерции заднего моста, кг · м ²	1
Передаточный коэффициент трансмиссии	1
Механический КПД трансмиссии	0,9
Коэффициент сопротивления уводу колеса, без приложенного момента, кН/рад	88,7832

В качестве закона управления моментом на валу двигателя для поддержания заданной скорости использовался закон, синтезированный с помощью метода обратной динамики (4) и исследованный в работах [7, 8]:

$$M_d = \int \rho(\lambda(\omega^0 - \omega(t)) - \omega(t))dt + M_d^0, \quad (4)$$

где ρ — постоянная, определяющая скорость схождения алгоритма управления к оптимальному, при котором реакция на ступенчатое управляющее воздействие будет описываться экспоненциальной функцией вида $v_x(t) = v_x^*(1 - e^{-\lambda t})$, где v_x^* — желаемая скорость движения автомобиля; λ — величина, обратная постоянной времени переходного процесса изменения скорости; M_d^0 — начальная величина движущего момента.

Моделирование проводилось при следующих численных значениях указанных параметров: $\rho = 100$; $\lambda = 1,34$; $M_d^0 = 750$.

При этом предполагается, что торможение автомобиля осуществляется только за счет снижения мощности двигателя, и следовательно, момент, задаваемый данным законом управления, может принимать только положительные значения.

Предикторное управление

Одним из наиболее исследованных методов решения задачи управления движением автомобиля является метод предикторного управления (управления с предсказанием), рассмотренный в работах [1—4], где управляющее воздействие находится из условия минимизации отклонения желаемой траектории от прогнозируемой на определенном интервале времени. Для предсказания положения авто-

мобиля, определяемого его боковым смещением относительно дороги, используется упрощенная двухколесная модель движения автомобиля (рис. 1). При этом считается, что скорость движения автомобиля остается постоянной на всем интервале прогнозирования, а все коэффициенты, описывающие физические свойства автомобиля, известны и не изменяются во времени.

Для этого случая математическая модель (1) может быть записана в виде

$$\dot{X} = FX + G\theta; \quad (5)$$

$$F = \begin{bmatrix} -\frac{k_{yB1} + k_{yB2}}{m_a v_x} & -\left(\frac{k_{yB1} l_1 + k_{yB2} l_2}{m_a v_x} + v_x\right) & 0 & 0 \\ \frac{k_{yB1} l_1 - k_{yB2} l_2}{J_z v_x} & -\frac{k_{yB1} l_1^2 + k_{yB2} l_2^2}{J_z v_x} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{k_{yB1} \theta}{m_a} \\ \frac{k_{yB1} l_1 \theta}{J_z} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} v_y \\ \omega \\ y \\ \varphi \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где φ — угол поворота автомобиля относительно связанной с ним оси z ; C — матрица, на которую нужно умножить транспонированный вектор переменных X , чтобы получить боковое смещение автомобиля в системе координат XYZ , связанной с дорогой:

$$y(t) = X(t)^T C. \quad (8)$$

Решение уравнения (5) запишем в виде

$$X(t) = e^{tF} X_0 + \int_0^t e^{\tau F} G \theta d\tau. \quad (9)$$

В качестве меры отклонения желаемой траектории $y_d(t)$ от действительной $y(t)$ примем функционал

$$\begin{aligned} J(\theta) &= \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - y(\tau))^2 d\tau = \\ &= \int_0^{T_p} (y_d(\tau) - X(\tau)^T C)^2 d\tau, \end{aligned} \quad (10)$$

где T_p — время прогнозирования.

Тогда оптимальное управление θ^* (угол поворота управляемых колес), минимизирующее значение функционала $J(\theta)$, найдем из условия

$$\frac{dJ(\theta)}{d\theta} = 0.$$

После подстановки (8)–(10) и преобразований искомое управление θ^* может быть записано в виде

$$\theta^* = \frac{\int_0^{T_p} (y_D(\tau) - (e^{\tau F} X_0)^T C) \left(\int_0^{\tau} (e^{tF} G)^T C dt \right) d\tau}{\int_0^{T_p} \left(\int_0^{\tau} (e^{tF} G)^T C dt \right)^2 d\tau}.$$

Заменив операции интегрирования конечными суммами, получим

$$\theta^* = \frac{\sum_{i=1}^N (y_D(t_i) - (e^{t_i F} X_0)^T C) \left(\int_0^{t_i} (e^{tF} G)^T C dt \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\int_0^{t_i} (e^{tF} G)^T C dt \right)^2}, \quad (11)$$

где $t_i = \frac{i T_p}{N}$.

Управляющее воздействие θ^* рассчитывается через каждые T_p/N_{eval} с, где N_{eval} — число шагов расчета управляющего воздействия.

Схема системы управления, реализующей указанный способ управления траекторией движения автомобиля, приведена на рис. 2.

Система работает в дискретном режиме, а предикторный регулятор представляет собой программу, выполняемую на микроконтроллере или ЭВМ. На вход предикторного регулятора курса поступают данные о прогнозируемом изменении желаемой траектории движения $\{y^*(t_k), \dots, y^*(t_k + T_p)\}$, продольной $v_x(t_k)$ и поперечной $v_y(t_k)$ текущих скоростях движения автомобиля, угловой скорости $\omega(t_k)$ и ориентации $\varphi(t_k)$ автомобиля, вычисленных в системе координат, связанной с центром масс автомобиля, в дискретные моменты времени $t_k, k = 0, 1, 2, \dots$. Эта информация используется для прогнозирования будущего положения автомобиля и вычисления такого положения управляемых колес, при котором отклонение от желаемой траектории движения было бы минимальным.

Вычисленное положение $\theta(t_k)$ управляемых колес передается приводу рулевого управления, работа которого моделировалась с помощью аperiodического звена с постоянной времени, равной 0,62 с.

Как следует из (11), способ предикторного управления предполагает знание параметров, описывающих физические свойства автомобиля (6), (7) и вид желаемой траектории движения на участке, который автомобиль преодолевает за время прогнозирования.

Для определения значений коэффициентов сопротивления уводу переднего и заднего мостов автомобиля было проведено моделирование движения автомобиля по прямой траектории с постоянной скоростью, результаты которого приведены в табл. 1.

При моделировании на вход системы управления, соответствующий желаемой траектории движения, подавали гармоническое воздействие

$$y^*(t_k) = A \sin(F_{req} t_k) \quad (12)$$

с амплитудой $A = 1$ м, и частотой $F_{req} = 1$ рад/с.

Для выбора оптимального времени прогнозирования и числа шагов расчета управляющего воздействия использовали алгоритм Гаусса—Ньютона. В качестве целевой функции было использовано среднее квадратичное значение ошибки бокового смещения автомобиля относительно дороги на интервале времени 40 с и с дискретностью 0,01 с. Путем

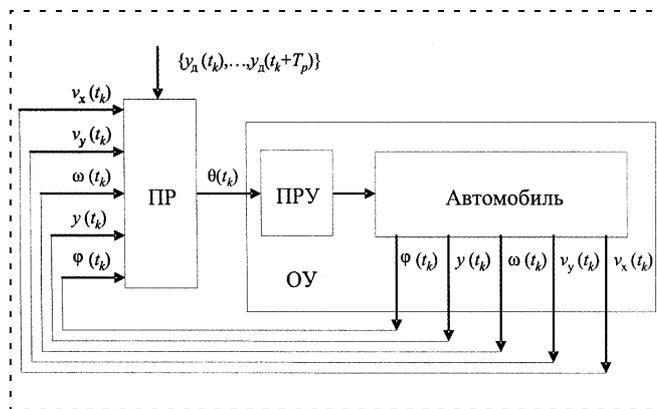


Рис. 2. Схема предикторной системы управления: ПР — предикторный регулятор траектории движения автомобиля; ОУ — объект управления; ПРУ — привод рулевого управления

Таблица 1
Коэффициенты увода переднего и заднего мостов автомобиля при установившемся прямолинейном движении

Скорость движения, км/ч	$k_{ув1}$, Н/рад	$k_{ув2}$, Н/рад
60	177566,4	171382,6
80	177566,4	170760,6
100	177566,4	169944,5

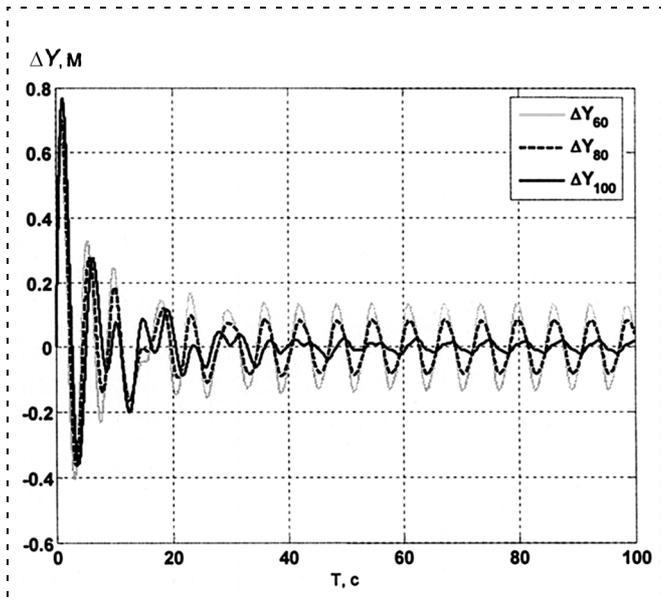


Рис. 3. Изменение ошибки положения автомобиля при испытаниях предикторной системы управления на скоростях 100 км/ч, 80 км/ч и 60 км/ч

предварительного моделирования было установлено, что данного времени достаточно для того, чтобы движение автомобиля можно было считать установившимся.

В качестве начальных значений выбирали $T_p^{begin} = 10$ с, $N_{eval}^{begin} = 1000$; значения приращений T_p , N_{eval} составляли 0,01. Предполагалось также, что быстроедействие микроконтроллера, реализующего управление, позволяет вычислять новое значение управляющего воздействия каждые 0,01 с.

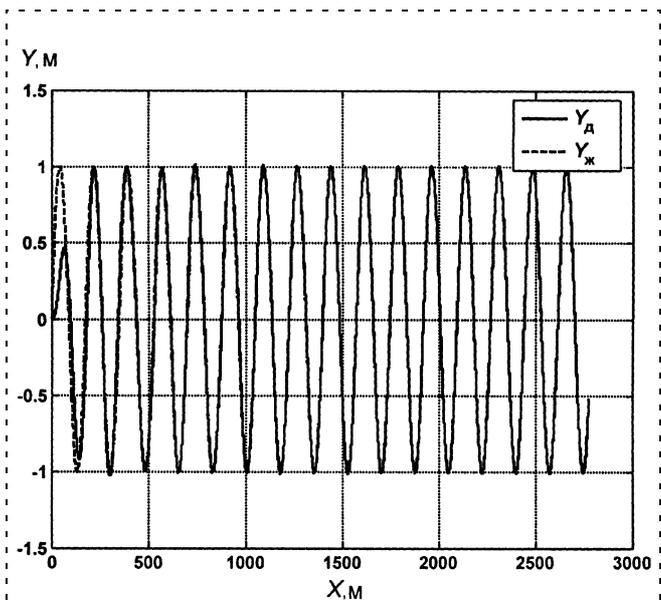


Рис. 4. График действительной и желаемой траекторий движения при испытаниях предикторной системы управления на скорости 100 км/ч

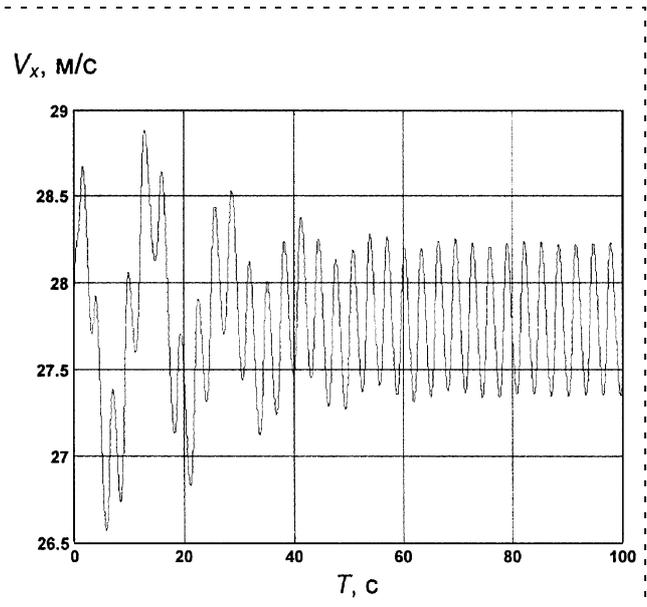


Рис. 5. График изменения поступательной скорости движения автомобиля при испытаниях предикторной системы управления

Численный эксперимент проводили при скоростях движения автомобиля 60, 80 и 100 км/ч, что соответствует максимальным ограничениям при движении по городу и за его пределами.

На рис. 3 показано изменение ошибки по положению при проведении всех трех экспериментов. Из данного графика видно, что с увеличением скорости движения установившаяся ошибка уменьшается.

Более детальное представление о характере движения автомобиля можно получить из рис. 4 и 5. Как видно из рис. 3 и 4, для выхода на желаемую тра-

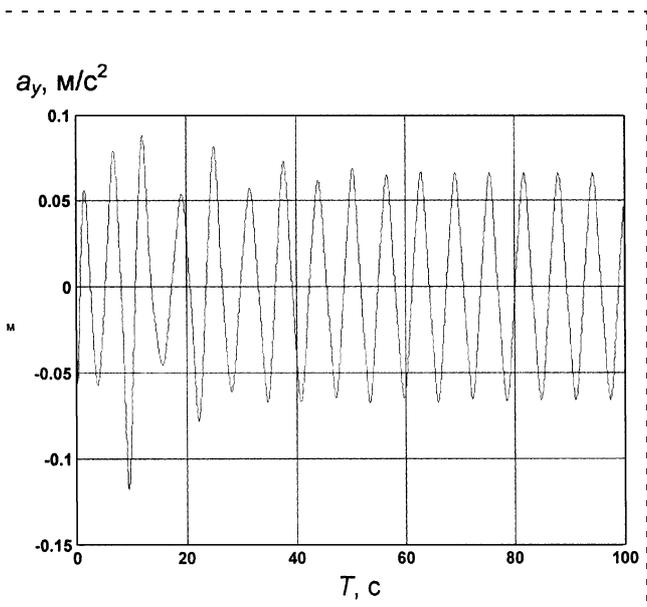


Рис. 6. Боковое ускорение при движении автомобиля при испытаниях предикторной системы управления на скорости 100 км/ч

Таблица 2

Результаты моделирования работы предикторного регулятора

Скорость движения, км/ч	T_p	N_{eval}	Дистанция обзора, м	Средняя квадратичная ошибка	Максимальная ошибка на всем интервале, м	Максимальная установившаяся ошибка, м
60	1,48	148	24,67	0,02848	0,629	0,134
80	1,71	171	38	0,02842	0,7	0,083
100	1,95	195	54,17	0,02442	0,766	0,021

екторию автомобилю требуется время (около 20 с). Ошибка по положению сначала достигает максимума и затем уменьшается. Скорость движения автомобиля (рис. 5) при этом сначала изменяется в довольно широких пределах, поскольку изменение угла θ поворота управляемых колес приводит к значительному возрастанию сил сопротивления качению переднего и заднего мостов автомобиля и, как следствие, к изменениям в скорости движения, которые не успевают в полной мере обрабатываться регулятором скорости (4).

Для того, чтобы определить, насколько комфортно будут чувствовать себя пассажиры, проводили расчет бокового ускорения (рис. 6).

При моделировании работы предикторного регулятора вычисляли среднюю квадратичную ошибку за время 100 с, а также максимальную ошибку (возникает в начале работы системы управления, когда отклонение курса автомобиля от заданного максимально) и максимальную установившуюся ошибку. Полученные результаты сведены в табл. 2.

Из представленных результатов (рис. 3–6, табл. 2) можно сделать вывод, что система управления хо-

рошо справилась с поставленной задачей, обеспечив установившуюся ошибку при движении по заданной траектории, не превышающую 14 см, что меньше предела в 30 см, принимаемого за удовлетворительное значение [4]. Заметим, что боковое ускорение (рис. 6), которое при этом ощущали бы пассажиры транспортного средства, не превысило 0,13g.

Однако, если предположить, что желаемая траектория движения проходит по середине полосы, выделенной дорожной разметкой, то при ограниченной видимости ошибка может возрастать. Данное обстоятельство накладывает дополнительное ограничение на максимальную скорость движения автомобиля.

Нечеткое управление

В реальных условиях водитель при управлении автомобилем опирается на практический опыт вождения, оценивая дорожную обстановку в соответствии со своим восприятием. При этом, в предположении о том, что желаемая траектория движения автомобиля определяется разметкой и представляет собой линию, совпадающую с серединой полосы движения, водитель одновременно решает две задачи: управление направлением движения (курсом) и управление боковым смещением автомобиля относительно дороги, т. е. он удерживает курс и компенсирует боковое смещение, вводя поправку в желаемый курс движения автомобиля.

Прежде чем сформулировать словесное описание действий, которые должен осуществлять водитель, примем, что поворот управляемых колес вправо соответствует отрицательному направлению,

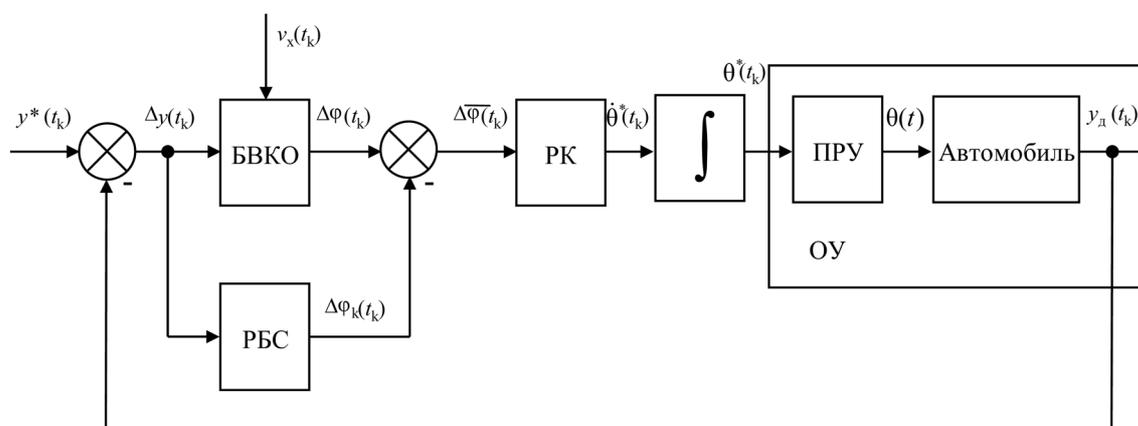


Рис. 7. Функциональная схема нечеткой системы управления движением автомобиля:

БВКО — блок вычисления курсовой ошибки; РБС — регулятор бокового смещения; РК — регулятор курса; ∫ — дискретный интегратор; ПРУ — привод рулевого управления

а влево — положительному. Если автомобиль отклоняется от намеченного курса или траектории движения вправо, то такую ошибку будем считать отрицательной, а если влево — положительной (см. рис. 1). При отклонении от желаемой траектории управляющее воздействие будет зависеть от отклонения и скорости ее изменения. Описание процесса формирования этого воздействия может быть формализовано посредством нечеткой логики.

Функциональная схема такой системы управления приведена на рис. 7.

Система работает в дискретном режиме, а нечеткое управление реализуется программой, выполняемой микроконтроллером или ЭВМ. На вход системы управления подается информация о желаемом положении автомобиля y^* и текущем боковом смещении относительно дороги y_d , а на внешний вход блока вычисления курсовой ошибки (БВКО) — значение текущей скорости движения автомобиля v_x . На основании данных об ошибке по положению $\Delta y(t_k) = y^*(t_k) - y_d(t_k)$ и текущей скорости автомобиля v_x вычисляется отклонение движения автомобиля от желаемого курса по формуле

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{\Delta y}{v_x}\right).$$

Полученная курсовая ошибка $\Delta\varphi$ подается на регулятор курса, который формирует управляющее воздействие θ^* , уменьшающее отклонение движения автомобиля от желаемого курса, передаваемое на дискретный интегратор и далее на привод рулевого управления.

Для того чтобы минимизировать боковое смещение автомобиля относительно центра полосы движения Δy , используется регулятор бокового смещения, который формирует поправку $\Delta\varphi_k$ к текущему курсу автомобиля.

В качестве входных переменных регулятора курса (РК) и регулятора бокового смещения (РБС) были использованы ошибка, скорость и ускорение изменения ошибки:

$$[\theta_1^i(t_k), \theta_2^i(t_k), \theta_3^i(t_k)], \text{ где } i \in \{\text{РК, РБС}\},$$

которые можно вычислить с помощью разностных выражений:

$$\begin{cases} \theta_1^i(t_k) = \begin{cases} \Delta y(t_k), & \text{если } i = \text{РБС}; \\ \Delta\varphi(t_k), & \text{если } i = \text{РК}; \end{cases} \\ \theta_2^i(t_k) = (\theta_1^i(t_k) - \theta_1^i(t_{k-1}))/h; \\ \theta_3^i(t_k) = (\theta_2^i(t_k) - \theta_2^i(t_{k-1}))/h, \end{cases}$$

где h — период дискретизации.

При этом каждая входная переменная $[\theta_1^i(t_k), \theta_2^i(t_k), \theta_3^i(t_k)]$ отображается на универсальное множество $[0, L - 1]$ посредством масштабирования:

$$U_j = \frac{(\Theta_j - \Theta_{Hj})(U_B - U_H)}{\Theta_{Bj} - \Theta_{Hj}} + U_H,$$

где Θ_j — входная величина, подаваемая на вход регулятора; Θ_{Bj}, Θ_{Hj} — ее верхний и нижний пределы; U_j — величина, полученная в результате масштабирования; U_B, U_H — пределы этой величины.

Таким образом,

$$\begin{cases} u_1^i = \frac{(\theta_1^i - \theta_{H1}^i)(u_B^i - u_H^i)}{\theta_{B1}^i - \theta_{H1}^i}; \\ u_2^i = \frac{(\theta_2^i - \theta_{H2}^i)(u_B^i - u_H^i)}{\theta_{B2}^i - \theta_{H2}^i}; \\ u_3^i = \frac{(\theta_3^i - \theta_{H3}^i)(u_B^i - u_H^i)}{\theta_{B3}^i - \theta_{H3}^i}, \end{cases}$$

где $i \in \{\text{РК, РБС}\}$.

Значение управляющего воздействия, получаемое на выходе нечеткого регулятора, восстанавливается посредством обратного преобразования:

$$m^i = m_{\min}^i + (m_{\max}^i - m_{\min}^i)U_j, \text{ где } i \in \{\text{РК, РБС}\}.$$

Для входных переменных регулятора контура управления курсом (курсовой ошибки $u_1^{\text{РК}}(t_k)$, скорости изменения $u_2^{\text{РК}}(t_k)$ и ускорения курсовой ошибки $u_3^{\text{РК}}(t_k)$) были выбраны девять термов: отрицательный, отрицательный большой, отрицательный средний, отрицательный малый, нулевой, положительный малый, положительный средний, положительный большой, положительный {О, ОБ, ОС, ОМ, Н, ПМ, ПС, ПБ, П} (рис. 8).

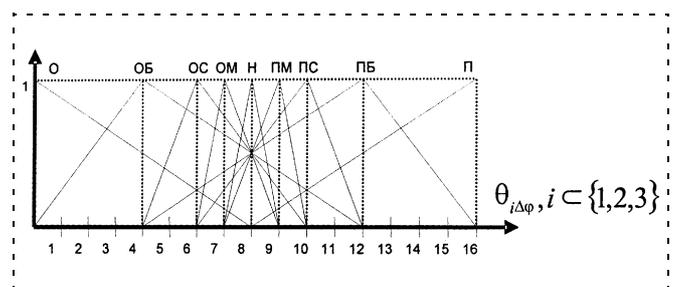


Рис. 8. Термы входных переменных регулятора курса

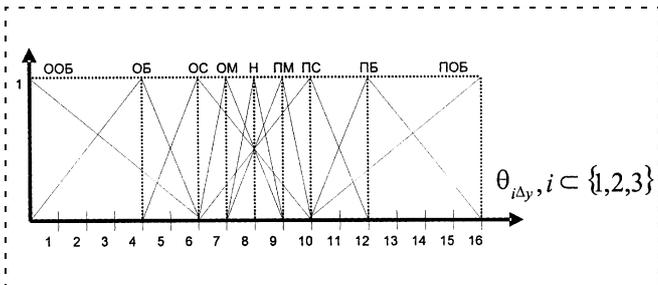


Рис. 9. Термы входных переменных регулятора бокового смещения

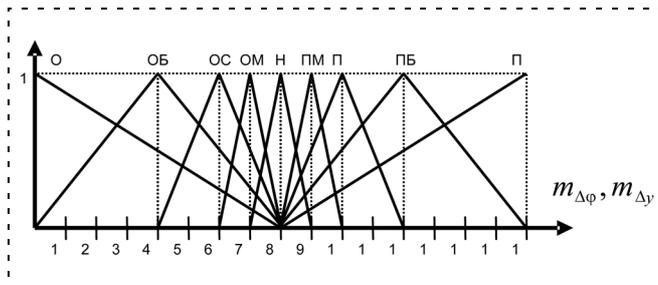


Рис. 10. Термы выходных переменных регуляторов курса и бокового смещения

Для входных переменных регулятора контура управления боковым смещением (смещения автомобиля относительно центра полосы движения $u_1^{РБС}(t_k)$, скорости $u_2^{РБС}(t_k)$ и ускорения изменения смещения $u_3^{РБС}(t_k)$) также были выбраны девять термов: отрицательный очень большой, отрицательный большой, отрицательный средний, отрицательный малый, нулевой, положительный малый, положительный средний, положительный большой {ООБ, ОБ, ОС, ОМ, Н, ПМ, ПС, ПБ, ПОБ} (рис. 9).

Для выходных переменных $m^{РК}$, $m^{РБС}$ использовали следующие девять термов — отрицательный, отрицательный большой, отрицательный средний, отрицательный малый, нулевой, положительный малый, положительный средний, положительный большой, положительный {О, ОБ, ОС, ОМ, Н, ПМ, ПС, ПБ, П} (рис. 10).

Поскольку при формировании базы правил за основу было принято предположение о том, что большему отклонению должно соответствовать большее управляющее воздействие, для регулятора курса, в зависимости от курсовой ошибки, были сформулированы следующие правила:

- если отклонение от курса положительное, то изменять курс в отрицательном направлении;
- если отклонение от курса отрицательное, то изменять курс в положительном направлении;

- если отклонение от курса примерно нулевое, то курс не изменять;
- если отклонение от курса отрицательное большое, то поворачивать руль в положительном направлении с большой скоростью;
- если отклонение от курса положительное большое, то поворачивать руль в отрицательном направлении с большой скоростью;
- если отклонение от курса отрицательное среднее, то поворачивать руль в положительном направлении со средней скоростью;
- если отклонение от курса положительное среднее, то поворачивать руль в отрицательном направлении со средней скоростью;
- если отклонение от курса отрицательное малое, то поворачивать руль в положительном направлении с малой скоростью;
- если отклонение от курса положительное малое, то поворачивать руль в отрицательном направлении с малой скоростью.

Аналогичные правила были сформулированы и для скорости и ускорения изменения отклонения от курса. Общая база правил для регулятора курса может быть представлена в виде табл. 3.

Аналогичная таблица (табл. 4) может быть записана и для регулятора бокового смещения автомобиля.

Таблица 3

База правил регулятора курса

$\theta_{1\Delta\phi}$	$m_{\Delta\phi}$	$\theta_{2\Delta\phi}$	$m_{\Delta\phi}$	$\theta_{3\Delta\phi}$	$m_{\Delta\phi}$
О	П	О	П	О	П
ОБ	ПБ	ОБ	ПБ	ОБ	ПБ
ОС	ПС	ОС	ПС	ОС	ПС
ОМ	ПМ	ОМ	ПМ	ОМ	ПМ
Н	Н	Н	Н	Н	Н
ПМ	ОМ	ПМ	ОМ	ПМ	ОМ
ПС	ОС	ПС	ОС	ПС	ОС
ПБ	ОБ	ПБ	ОБ	ПБ	ОБ
П	О	П	О	П	О

Таблица 4

База правил регулятора бокового смещения

$\theta_{1\Delta y}$	$m_{\Delta y}$	$\theta_{2\Delta y}$	$m_{\Delta y}$	$\theta_{3\Delta y}$	$m_{\Delta y}$
ООБ	О	ООБ	О	ООБ	О
ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ
ОС	ОС	ОС	ОС	ОС	ОС
ОМ	ОМ	ОМ	ОМ	ОМ	ОМ
Н	Н	Н	Н	Н	Н
ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ	ПМ
ПС	ПС	ПС	ПС	ПС	ПС
ПБ	ПБ	ПБ	ПБ	ПБ	ПБ
ПОБ	П	ПОБ	П	ПОБ	П

Настройка каждого регулятора сводится к выбору оптимальных, в смысле минимизации средней квадратичной ошибки по методу Гаусса—Ньютона, диапазонов масштабирования входных и выходных переменных.

$$\begin{cases} \Delta\theta_1^{\text{PK}} [\theta_{\text{H1}}^{\text{PK}}; \theta_{\text{B1}}^{\text{PK}}]; \\ \Delta\theta_2^{\text{PK}} [\theta_{\text{H2}}^{\text{PK}}; \theta_{\text{B2}}^{\text{PK}}]; \\ \Delta\theta_3^{\text{PK}} [\theta_{\text{H3}}^{\text{PK}}; \theta_{\text{B3}}^{\text{PK}}]; \\ \Delta m^{\text{PK}} [m_{\text{min}}^{\text{PK}}; m_{\text{max}}^{\text{PK}}]; \end{cases} \begin{cases} \Delta\theta_1^{\text{РБС}} [\theta_{\text{H1}}^{\text{РБС}}; \theta_{\text{B1}}^{\text{РБС}}]; \\ \Delta\theta_2^{\text{РБС}} [\theta_{\text{H2}}^{\text{РБС}}; \theta_{\text{B2}}^{\text{РБС}}]; \\ \Delta\theta_3^{\text{РБС}} [\theta_{\text{H3}}^{\text{РБС}}; \theta_{\text{B3}}^{\text{РБС}}]; \\ \Delta m^{\text{РБС}} [m_{\text{min}}^{\text{РБС}}; m_{\text{max}}^{\text{РБС}}]. \end{cases}$$

В целях упрощения процедуры настройки верхняя и нижняя границы диапазона масштабирования каждой переменной (как отрицательная, так и положительная) были приняты равными по величине.

При этом сначала настраивали контур управления курсом, затем — контур управления боковым смещением автомобиля.

Настройку проводили в условиях подачи на вход, соответствующий желаемой траектории движения, гармонического воздействия с амплитудой 1 м и частотой 1 рад/с, описываемого выражением (12). Скорость движения автомобиля при этом поддерживали равной 100 км/ч, а время, в течение которого моделировали движение автомобиля, составляло 40 с. Предварительное моделирование показало, что этого времени достаточно для того, чтобы процесс изменения ошибки регулирования можно было считать установившимся.

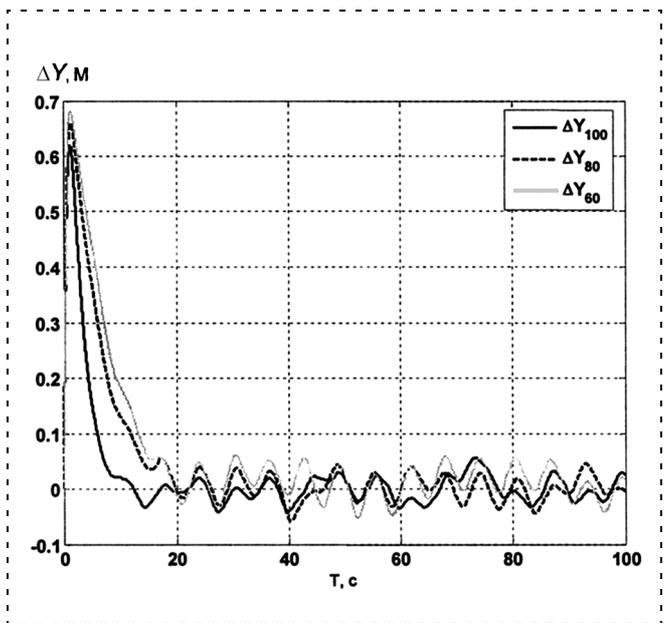


Рис. 11. Изменение ошибки положения автомобиля при испытаниях нечеткой системы управления на скоростях 100 км/ч, 80 км/ч и 60 км/ч

В результате были получены следующие значения масштабирующих коэффициентов:

$$\begin{cases} \Delta\theta_1^{\text{PK}} [-11,9782; 11,9782]; \\ \Delta\theta_2^{\text{PK}} [-2,2249; 2,2249]; \\ \Delta\theta_3^{\text{PK}} [-1,4440; 1,4440]; \\ \Delta m^{\text{PK}} [-87,2048; 87,048]; \end{cases} \begin{cases} \Delta\theta_1^{\text{РБС}} [-75,9161; 75,9161]; \\ \Delta\theta_2^{\text{РБС}} [-48,0978; 48,0978]; \\ \Delta\theta_3^{\text{РБС}} [-86,8229; 86,8229]; \\ \Delta m^{\text{РБС}} [-210,0821; 210,0821]. \end{cases}$$

После окончательной настройки были проведены испытания полученной системы нечеткого управления, результаты которых приведены ниже.

На рис. 11 показано изменение ошибки по положению при проведении трех экспериментов (при движении на скорости 60, 80 и 100 км/ч). Из данного графика видно, что установившаяся ошибка практически не изменяется при увеличении скорости движения, оставаясь меньше 10 см. При этом уменьшение ошибки происходит более плавно по сравнению с предикторным регулятором (рис. 3), работа которого характеризуется сильными колебаниями в начальный момент времени.

Из анализа дополнительных графиков (рис. 12, 13), приведенных для скорости движения, равной

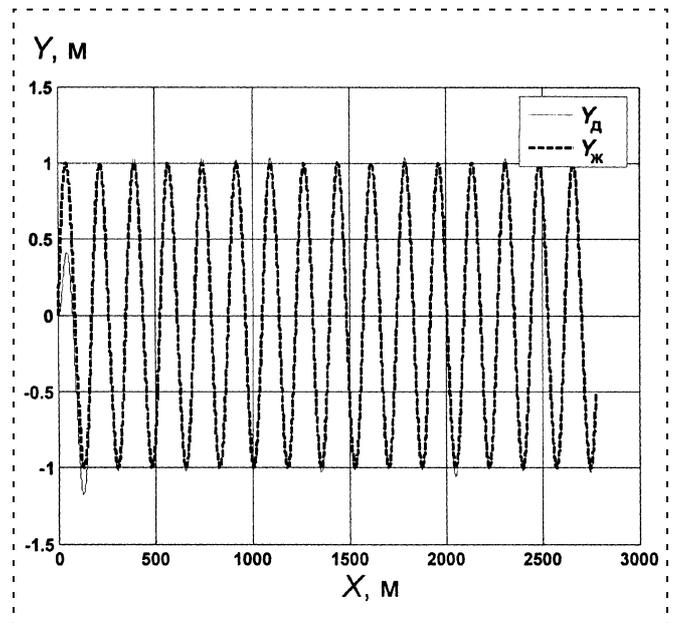


Рис. 12. График действительной и желаемой траекторий движения при испытаниях нечеткой системы управления на скорости 100 км/ч

100 км/ч, следует, что в начальный момент автомобиля под управлением нечеткого регулятора также требуется время (менее 20 с) для того, чтобы выйти на желаемую траекторию $y_{ж}$, однако скорость движения при этом испытывает меньшие возмущения (рис. 13).

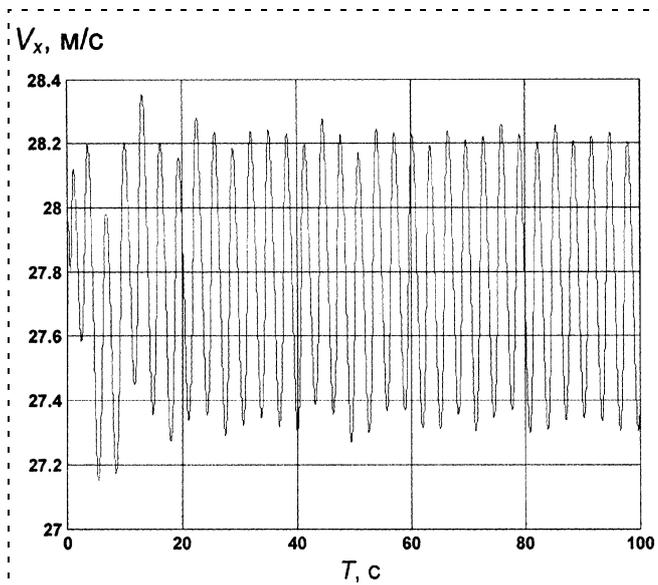


Рис. 13. График изменения поступательной скорости движения автомобиля при испытании нечеткой системы управления

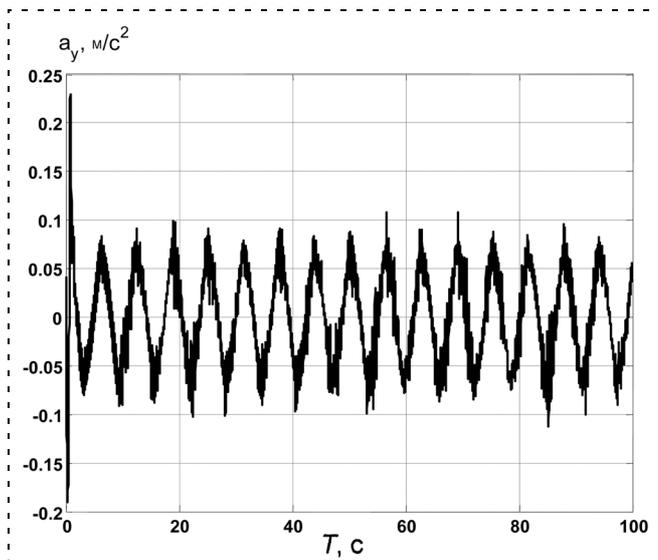


Рис. 14. Боковое ускорение при движении автомобиля при испытаниях нечеткой системы управления на скорости 100 км/ч

Таблица 5

Результаты моделирования работы нечеткой системы управления

Скорость, км/ч	Средняя квадратичная ошибка	Максимальная ошибка на всем интервале, м	Максимальная установившаяся ошибка, м
60	0,00678	0,682	0,060
80	0,00664	0,660	0,058
100	0,00243	0,620	0,057

Полученные результаты (рис. 11–14, табл. 5) свидетельствуют о том, что нечеткая система управления обеспечивает меньшую установившуюся ошибку регулирования на скоростях 80 и 60 км/ч (при скорости 100 км/ч она оказалась немного больше). Внимания заслуживает тот факт, что ошибка регулирования в меньшей степени зависит от скорости движения автомобиля (несмотря на отсутствие подстройки регулятора под каждое значение скорости), а боковое ускорение, которое испытывали бы пассажиры, не превысило десятых долей g .

Выводы

Проведенный анализ предикторной и нечеткой систем управления движением автомобиля выявил преимущества последней, которые проявляются в отсутствии необходимости подстройки при изменении скорости движения и меньшей зависимости от условий видимости. Случай потери видимости разметки в данной работе не рассматривался и требует отдельного исследования.

Нечеткий регулятор может быть легко заменен своей аппроксимацией по форме, соответствующей поверхности отклика, сформированной с использованием одного или нескольких ПИД-регуляторов [9, 10], а входные параметры этого регулятора не являются продуктом сложных вычислений.

Последнее обстоятельство представляет особый практический интерес, поскольку позволяет реализовать алгоритмы нечеткого управления аппаратными средствами без использования ЭВМ.

Список литературы

1. Steven D. Keen, David J. Cole. Steering Control Using Model Predictive Control and Multiple Internal Models // The 8th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control, 2006.
2. MacAdam C. C. An Optimal Preview Control for Linear Systems // J. Dyn. Sys. Measur. Control. 1980. 102. 188–193.
3. MacAdam C. C. Application of an optional preview control for simulation of closed-loop automobile driving // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-11(6). 1981. P. 393–399.
4. Универсальный механизм 4.0: Руководство пользователя.
5. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля: Учеб. для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 478 с.
6. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин: Учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
7. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
8. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. М.: Наука, 1987.
9. Алексеев К. Б., Малявин А. А. Управление скоростью вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания на базе нечеткой логики // Машиностроение и инженерное образование. 2007. № 1. С. 14–24.
10. Алексеев К. Б., Малявин А. А. Синтез регулятора скорости вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания на основе нечеткого управления // Машиностроение и инженерное образование. 2007. № 12. С. 34–37.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук,
гл. научн. сотрудник,

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук,
ст. научн. сотрудник,
Институт автоматики

и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
devyatis@iacp.dvo.ru

Управление безопасным движением автомобилей в транспортном потоке

Сформулированы и систематизированы основные типы моделей управляющей продольным движением автомобилей системы. Выполнено численное моделирование, результаты которого подтверждают эффективность применения моделей управления для снижения амплитуды путевых колебаний в потоке транспортных средств.

Ключевые слова: автомобиль, транспортный поток, система управления, ситуационное управление, путевые колебания автомобиля.

Введение

Актуальность проблемы управления безопасным движением автотранспорта повышается с каждым годом. Ежегодно на дорогах страны погибает более 30 тыс. и получают ранения свыше 200 тыс. человек. Особое негативное влияние на функционирование транспортных магистралей оказывает их перегрузка насыщенными потоками автомобилей. Психологические особенности человека-водителя, связанные с запаздыванием и особенностями его реакции, обуславливают неустойчивое поведение автомобиля в потоке, приводящее к распространению вдоль колонны усиливающегося возмущения положения и скорости, что является одной из причин снижения средней скорости движения и столкновения автомобилей. Научные и технические разработки последнего времени направлены на обеспечение водителя навигационной и текущей информацией о насыщенности потока, оптимальном режиме вождения и предупреждение об опасном сближении автомобилей [1, 2]. Можно отметить также работы, направленные непосредственно на исследование моделей управления продольным движением автомобиля [3, 4]. Вместе с тем, исследования моделей систем управления, обеспечивающих безопасное и устойчивое движение автомобиля в насыщенном транспортном потоке (фрагменте потока — колонне), далеки от завершения.

В связи с этим в данной статье ставится задача разработки и систематизации основных типов моделей следящей управляющей безопасным движением

автомобиля системы, ориентированных на снижение амплитуды путевых продольных колебаний и исключение столкновений в потоке транспорта.

Основные модельные представления

В качестве базовой для описания системы управления автомобилем (далее транспортной единицы — ТЕ) определим задачу следования за лидером в паре "ведущий—ведомый" (ТЕ₁—ТЕ₂), когда движение ТЕ₂ в направлении оси ox организуется таким образом, чтобы между ТЕ с достаточной точностью поддерживалось расстояние d_0 , считающееся безопасным при осуществляемом режиме движения в конкретных дорожных условиях [3]. Уравнения движения ТЕ в удельных силах (ускорениях) с учетом гипотезы об одномерном движении имеют вид

$$\ddot{R}_i = F_i, R_i(0) = R_{i0}, \dot{R}_i(0) = \dot{R}_{i0}, i = 1, 2, \quad (1)$$

где значения индекса i относятся соответственно к ТЕ₁ и ТЕ₂, R_i — положение, а F_i — удельная сила (далее просто сила), обуславливающая движение i -й ТЕ.

Удельную силу можно представить следующим образом:

$$F_i = (D_i - T_i) - (A_i + Q_i), i = 1, 2, \quad (2)$$

где $(D_i - T_i)$ — сила, развиваемая движительно-тормозной системой (D_i — движущая сила и T_i — тормозящая сила); $A_i = a_i V_i$ — сила аэродинамического сопротивления; a_i — коэффициент сопротивления; $V_i = \dot{R}_i$ — скорость движения ТЕ _{i} ; Q_i — сила сопротивления качению. Учитывая, что в рассматриваемой задаче определяющее значение имеет относительное движение ТЕ, запишем его уравнение в отклонениях от предписанного значения d_0 :

$$\ddot{r} = F - u; r(0) = r_0; \dot{r}(0) = \dot{r}_0, \quad (3)$$

где $r = R_1 - R_2 - d_0$; $F = F_1 + (A_2 + Q_2)$; $u = D_2 - T_2$ — сила, развиваемая движительно-тормозной системой (ДТ-системой) ТЕ₂, причем $u^- \leq u \leq u^+$, что отвечает физическим представлениям о конечности возможностей ДТ-системы. Реальной силе u может быть поставлен в соответствие виртуальный (в бортовом компьютере ТЕ₂) образ W , формируемый, в свою очередь, на основе представлений об относительном движении ТЕ, характеризуемом вектором x . Операторную связь между объектами u , W , x формализуем следующим образом:

$$Du = W, W = Px, \quad (4)$$

где представления об операторах D и P , а также векторе состояния x излагаются несколько ниже.

Из (3) и (4) следует, что W должно формироваться на основе информации о силе F и фазовых переменных r и $\dot{r} = v$. Сначала дадим интерпретацию модели (3), пополнив ее моделью эволюции силы F . Учитывая неопределенность физических реализаций силы F в каждом конкретном случае и неограниченность многообразия таких реализаций, очевидно, можно говорить только об аппроксимационных моделях F , предполагая их последующую верификацию (например, в численном эксперименте) на определенных классах относительных движений и условий. Рассмотрим две достаточно простые конкурирующие между собой модели F , а именно

$$\dot{F} = 0, F(0) = F_0; \quad (5)$$

$$\ddot{F} = 0, F(0) = F_0, \dot{F}(0) = f. \quad (6)$$

Составим вектор x из оценок $\hat{r}, \hat{v}, \hat{F}$ соответственно величин r, v, F , т. е. $\hat{x} = (\hat{r}, \hat{v}, \hat{F})^T$, где "Т" — символ транспонирования векторов и матриц. Продолжая, таким образом, начатую интерпретацию, определим оператор P (4) как вектор $P = (p_1, p_2, p_3)$, полагая $P = p(x)$; последнее, по сути, является утверждением концепции ситуационного управления. Наконец, выделяя главное в динамике связи между W и u , характерное время (τ) реакции ДТ-системы, определим оператор этой связи в виде $D = d/dt + \mu$, где $\mu = 1/\tau$.

Для завершения процесса формирования информационной базы задачи в нее следует включить текущую информацию, доставляемую измерениями. Очевидно, что достаточные представления об относительном движении ТЕ могут быть получены путем измерения величин r и $\dot{r} = v$. Уравнения измерений в этом случае принимают вид

$$J_1 = r + \varepsilon_1, J_2 = v + \varepsilon_2, \quad (7), (8)$$

где J_1 и J_2 — измеренные значения величин r и v ; ε_1 и ε_2 — инструментальные погрешности измерителей.

Уравнения (3), (4) и (5), (7) или (3), (4) и (5)—(8) вместе составляют модели обратной задачи, целью решения которых является синтезирование управления W , обеспечивающего, по крайней мере, в характерных ситуациях приемлемое значение r , а следовательно, и выбор значения d_0 — порога безопасности движения ($|r| < d_0$).

Концепция решения

Концепция обсуждаемой здесь задачи предусматривает в том или ином виде связанное решение двух проблем: оценивания относительного поло-

жения r , скорости v , ускорения (силы F) и управления — построения силы u как функции оцениваемых переменных. В таком порядке и будем рассматривать обе эти задачи. Задача наблюдения представляется двумя типами моделей. Исходными уравнениями для этих моделей являются: для первого типа моделей — (3), (5), (7); для второго — (3), (5), (6), (7), (8). Ввиду наличия ошибок измерений ((7)—(8)) выполним их фильтрацию (оценивание). В отличие от [4], где оценивание выполнено методом наименьших квадратов, так как требовалась отдельная оценка положения и скорости ТЕ, в данном случае получение совместной оценки переменных $\hat{r}, \hat{v}, \hat{F}$ (или $\hat{r}, \hat{v}, \hat{F}, \hat{f}$) выполнено с помощью дискретного алгоритма Калмана [5].

Перейдем к задаче управления. Запишем выражение для управления W в наиболее общем виде:

$$W_i = P\hat{x}_i = p_1\hat{r}_i + p_2\hat{v}_i + p_3\hat{F}_i, i = 2, 3, 4, \dots \quad (9)$$

где W_i — управление ТЕ $_i$; $P = [p_1, p_2, p_3]$ — вектор коэффициентов управления; $\hat{x}_i = [\hat{r}_i, \hat{v}_i, \hat{F}_i]^T$ — оцененный вектор состояния по наблюдениям ТЕ $_i$ за относительным движением ТЕ $_{i-1}$. Отметим также, что для формирования управления W оцененная величина \hat{f} не используется. При этом динамические свойства ТЕ при заданном μ (см. выражение (4) и $D = d/dt + \mu$) зависят исключительно от значений коэффициентов p_1 и p_2 .

Рассмотрим область Ω устойчивости системы уравнений (3), (4) в пространстве параметров (p_1, p_2) , (здесь и далее принято $p_3 = 1$). При этом будем оставаться в рамках представлений о системе как о линейной, сняв ограничения на управление, и автономной, полагая $F = \hat{F} = 0, \hat{r} = r, \hat{v} = v$. Тогда

$$\begin{aligned} \dot{r} &= v, & r(t_0) &= r_0; \\ \dot{v} &= -u, & v(t_0) &= v_0; \\ \dot{u} &= -\mu u + p_1 r + p_2 v, & u(t_0) &= u_0, \end{aligned} \quad (10)$$

или $\dot{x} = Ax, x(t_0) = x_0$, где $x = (r, v, u)^T$,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ p_1 & p_2 & -\mu \end{pmatrix}.$$

Исследование характеристического уравнения системы (10) $|A - \lambda E| = 0$, где E — единичная матрица, λ — корни характеристического уравнения, показывает, что область устойчивого управления Ω определяется следующим образом: $p_1 > 0, p_1 < \mu p_2$, т. е. Ω — это часть плоскости (p_1, p_2) , находящаяся в первом квадранте и ограниченная осью p_2 и прямой $p_1 = \mu p_2$.

Рассмотрим на основе численного моделирования технологию выбора коэффициентов управления P и P^m , типичных для применения указанных коэффициентов в моделях 1.1, 1.2 и 3.1, 3.2 соответственно, в условиях достаточно характерного случая для городского насыщенного транспортного потока: головная ТЕ₁ движется со скоростью 30 км/ч и одновременно совершает продольные путевые колебания положения с ускорением, описываемым функцией (2) вида $\tilde{F}_1 = \tilde{F}_0 \sin(\omega_1 t) - (A_1 + Q_1)$ (значения параметров ТЕ приведены ниже). Примем во внимание предельные наибольшие значения параметров \tilde{F} и ω известными [3, 4], равными соответственно $\tilde{F}^* = 4,55 \text{ м/с}^2$ и $\omega^* = 0,628 \text{ с}^{-1}$. Выберем $\tilde{F}_0 = 0,5 \tilde{F}^*$, $\omega_1 = \omega^*$ и выполним многократное (по сетке значений параметров \tilde{p}_1 и \tilde{p}_2 или \tilde{p}_1^m и \tilde{p}_2^m на Ω , знак "∪" обозначает сеточные значения коэффициентов) полное имитационное численное моделирование задачи на временном интервале наблюдения $[0, T]$, $T = 2\pi N/\omega_1$, где в качестве N берется достаточно большое число. Принимая во внимание, что движение ТЕ₁ задано, определим коэффициенты управления движением колонны из четырех ТЕ, при которых достигаются поставленные в задаче цели — стабилизация транспортного потока.

При выполнении численного моделирования по сетке значений \tilde{p}_1^m и \tilde{p}_2^m выберем диапазон значений амплитуды ускорения \hat{F}_i равным $\Delta d = 0,5 \text{ м/с}^2$, внутри которого вектор коэффициентов управления равен P , а вне указанного диапазона коэффициенты управления принимаются равными P^m .

В качестве функционала для поиска оптимальных значений коэффициентов управления обычно принимается интегральное значение ошибки слежения [3] на заданном интервале времени. Для обеспечения устойчивости потока транспорта следует стремиться к применению таких коэффициентов управления, которые обеспечивают снижение в потоке амплитуды путевых колебаний каждой последующей ТЕ в сравнении с предыдущей. Поэтому в данном случае в качестве целевой функции выбрана $G = \frac{1}{m(n-1)A_1} \sum_{j=1}^m \sum_{i=2}^n (\Delta r_i)_j$, $n = 4$ (колонна из четырех ТЕ), $\Delta r_i = \max L_{i-1} - \max L_i$, j и m — порядковый номер и число максимумов путевых

колебаний L_{i-1} и L_i для ТЕ _{$i-1$} и ТЕ _{i} на интервале наблюдения $[0, 100]$ с; $L_\xi = R_\xi - V_\xi t$, V_ξ — постоянная составляющая путевой скорости ТЕ _{ξ} . Тогда искомые значения p_1 и p_2 целесообразно выбирать из условия $P = \arg \max_p G$ (аналогично определяются p_1^m и p_2^m).

Результаты численного моделирования свидетельствуют о существовании двух областей оптимальных значений коэффициентов управления. Первую из них (рис. 1, а — для измерений J_1 , рис. 1, б — для измерений J_1 и J_2) определим как область оптимальных значений коэффициентов управления p_1 и p_2 . Вторую (рис. 1, в — для измерений J_1 , рис. 1, г — для измерений J_1 и J_2) отнесем к области определения оптимальных значений коэффициентов управления p_1^m и p_2^m . На рис. 1 прямая ζ ограничивает сверху область устойчивого управления Ω .

Выбор коэффициентов p_1^m и p_2^m , которым соответствуют максимальные значения функции G (рис. 1, в и г), обеспечивает оптимальное устойчивое движение потока, при котором реализуется задача максимального снижения амплитуды путевых колебаний каждой последующей ТЕ _{i} по отношению к амплитуде колебаний впереди идущей ТЕ _{$i-1$} . В то же время для коэффициентов p_1 и p_2 из области их оптимальных значений характерно $G < 0$ (рис. 1, а и б), что связано с нарастанием амплитуды путевых колебаний каждой последующей ТЕ. В этом случае оптимальные значения упомянутых коэффициентов, минимизирующих нарастание амплитуды путевых колебаний, соответствуют максимуму отрицательного значения функции G . Для моделей, использующих коэффициенты управления P , оптимальные значения G существенно зависят от типа измерений J_1 (рис. 1, а) или J_1 и J_2 (рис. 1, б). В то же время значения G имеют один порядок в моделях, использующих коэффициенты P^m , при аналогичных типах измерений J_1 (рис. 1, в) или J_1 и J_2 (рис. 1, г), что свидетельствует о достаточности измерений J_1 для эффективной стабилизации движения в потоке при использовании моделей на основе модифицированных коэффициентов P^m .

Завершая изложение концепции решения, приведем, ссылаясь в целом на изложенный выше материал, систему уравнений, описывающую движение ТЕ _{i} :

$$\begin{aligned} \dot{R}_i &= V_i, & R_i(0) &= R_{i0}; \\ \dot{V}_i &= -(a_i V_i + Q_i) + u_i, & V_i(0) &= V_{i0}; \quad i = 2, 3, \dots, (11) \\ \dot{u}_i &= -\mu u_i + W_i, & u_i(0) &= u_{i0}; \end{aligned}$$

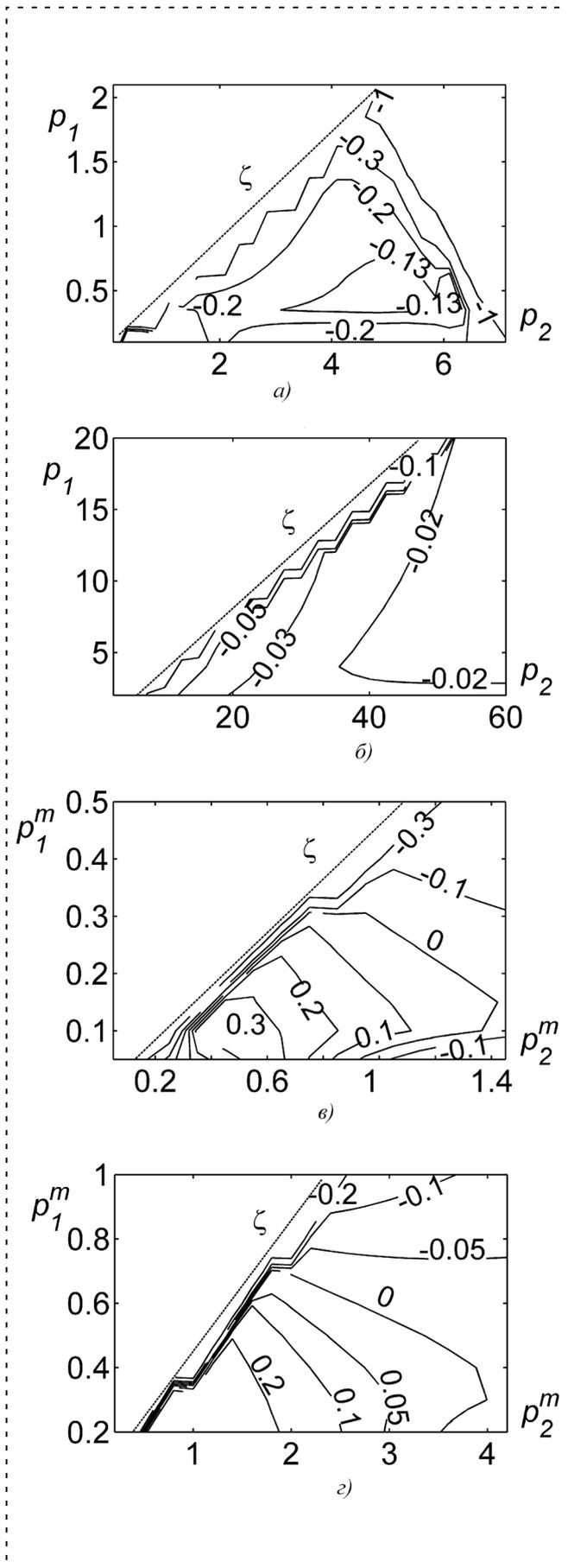


Рис. 1. Диаграммы изолиний целевой функции G

где W_i определяется из выражения (9), значения коэффициентов p_1 и p_2 (или p_1^m и p_2^m) выбираются из рис. 1, а векторы состояния \hat{x}_i (или \hat{x}_i^*) и типы наблюдений — из таблицы сообразно требованиям, предъявляемым к системе управления.

Рекуррентные выражения для переменных R_i , V_i , u_i получены путем дискретизации решения системы уравнений (11) на временном интервале h :

$$\begin{aligned}
 R_{i,k+1} = & \{h/a_i - \bar{a}_i^{-2} [1 - \exp(-a_i h)]\} Q_i - \{h/(\mu a_i) + \\
 & + (a_i + \mu)/\mu^2 \bar{a}_i^2 + [\mu^2 \exp(-a_i h) - \\
 & - \bar{a}_i^2 \exp(-\mu h)]/[\mu^2 \bar{a}_i^2 (a_i^2 - \mu)]\} W_{i,k} + \\
 & + R_{i,k} + [1 - \exp(-a_i h)/a_i] V_{i,k} + \\
 & + \{[1 + \exp(-\mu h)]/[\mu(a_i - \mu)] - \\
 & - [1 + \exp(-a_i h)]/[a_i(a_i - \mu)]\} u_{i,k}; \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{i,k+1} = & \bar{a}_i^{-1} [-1 + \exp(-a_i h)] Q_i + \\
 & + [1 - \exp(a_i h)]/(\mu a_i) W_{i,k} + \exp(-a_i h) V_{i,k} + \\
 & + [\exp(-\mu h) - \exp(-a_i h)]/(\mu a_i) u_{i,k}; \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$u_{i,k+1} = \mu^{-1} [1 - \exp(-\mu h)] W_{i,k} + \exp(-\mu h) u_{i,k}. \quad (14)$$

Как следует из содержания настоящего раздела, стратегия решения базируется на трех принципах:

- 1) разделение задач двух классов — наблюдения и управления;
- 2) обоснование решений внутри каждого;
- 3) конструирование замкнутой системы управления на основе численного имитационного моделирования характерных реальных ситуаций.

Численное моделирование движения ТЕ

Численное моделирование выполнено на фрагменте транспортного потока (колонна из четырех ТЕ: ТЕ₄—ТЕ₃—ТЕ₂—ТЕ₁, ТЕ₁ — головная; движение колонны направлено вдоль оси ox). Параметры движения ТЕ₁ заданы с учетом динамики, характерной для насыщенного потока городского транспорта, а именно: автомобиль движется со скоростью 30 км/ч и совершает одновременно колебания положения с периодом 10 с и амплитудой 5 м. Движение ТЕ₂, ТЕ₃ и ТЕ₄ вычислялось в соответствии с выражениями (12)—(14) с учетом типов измерений и моделей управления (см. таблицу).

Параметры автомобилей *Mazda RX-7* (ТЕ₁) и *Mercedes SL600* (ТЕ₂, ТЕ₃ и ТЕ₄) [6] следующие: $a_1 = 0,0287 \text{ с}^{-1}$, $a_2 \dots a_4 = 0,0281 \text{ с}^{-1}$; $Q_1 \dots Q_4 = 0,15 \text{ м/с}^2$;

$u_1^+ = 5,2 \text{ м/с}^2$, $|u_1^-| = 7,0 \text{ м/с}^2$, $u_2^+ \dots u_4^+ = 4,55 \text{ м/с}^2$,
 $|u_2^-| \dots |u_4^-| = 6,0 \text{ м/с}^2$; $\tau_1 \dots \tau_4 = \tau = 0,4 \text{ с}$. Среднеквадратические погрешности измерений расстояния и скорости составили: $\sigma_1 = 0,1 \text{ м}$, $\sigma_2 = 0,1 \text{ м/с}$ соответственно; начальные условия $\dot{R}_1(t_0) \dots \dot{R}_4(t_0) = 8,3 \text{ м/с}$ (30 км/ч), $r_0 = 0$; $d_0^{i-1, i} = 0,5 V_i \text{ м}$ (V_i — постоянная составляющая путевой скорости, измеренная в км/ч); временной шаг дискретизации наблюдений $h = 0,01 \text{ с}$. Выбраны следующие оптимальные значения коэффициентов управления: $p_1 = 0,5$, $p_2 = 4,5$ (рис. 1, а) для измерений типа J_1 ; $p_1 = 10$, $p_2 = 45$ (рис. 1, б) для измерений типа J_1 и J_2 ; $p_1^m = 0,15$, $p_2^m = 0,5$ (рис. 1, в) для измерений типа J_1 ; $p_1^m = 0,3$, $p_2^m = 1,5$ (рис. 1, г) для измерений типа J_1 и J_2 . Для моделей модифицированного управления (3.1—3.4, см. таблицу) диапазон значений амплитуды ускорения \hat{F} между ТЕ выбран равным $\Delta d = 0,5 \text{ м/с}^2$, внутри которого вектор $P^m = P$, а вне указанного диапазона коэффициенты управления принимают значения p_1^m и p_2^m .

Для наглядности применим сравнительный подход к представлению на одном рисунке результатов численного моделирования различных моделей управления.

На рис. 2 представлены результаты для моделей 1.1, 3.1 (тип измерений J_1) и 1.2, 3.2 (тип измерений J_1 и J_2). Здесь и в дальнейшем на рисунках L_i — путевые колебания положения ТЕ $_i$, $i = 1, \dots, 4$. Из диаграмм рис. 2, а и 2, в (фрагмент диаграмм, иллюстрирующий соотношение амплитуд) следует, что для линейного управления характерно увеличение амплитуды путевых колебаний положения каждой следующей ТЕ, что не способствует устойчивости потока, в то же время для модифицированного управления (рис. 2, б и 2, г) характерно снижение амплитуды аналогичных путевых колебаний. При этом следует отметить, что в сравнении с измерением J_1 для измерений J_1 и J_2 такое снижение проявляется более выражено.

На рис. 3 представлены диаграммы для моделей 1.3 и 3.3 (тип измерений J_1) и 1.4, 3.4 (тип измерений J_1 и J_2), которые отличаются от моделей 1.1, 3.1 и 1.2, 3.2 тем, что, например, ТЕ $_4$ дополнительно получает оцененные векторы состояния о слежении ТЕ $_3$ за ТЕ $_2$, а ТЕ $_2$ за ТЕ $_1$. В итоге, управление ТЕ $_4$ и ТЕ $_3$ формируется на основе расширенной информационной базы и может быть

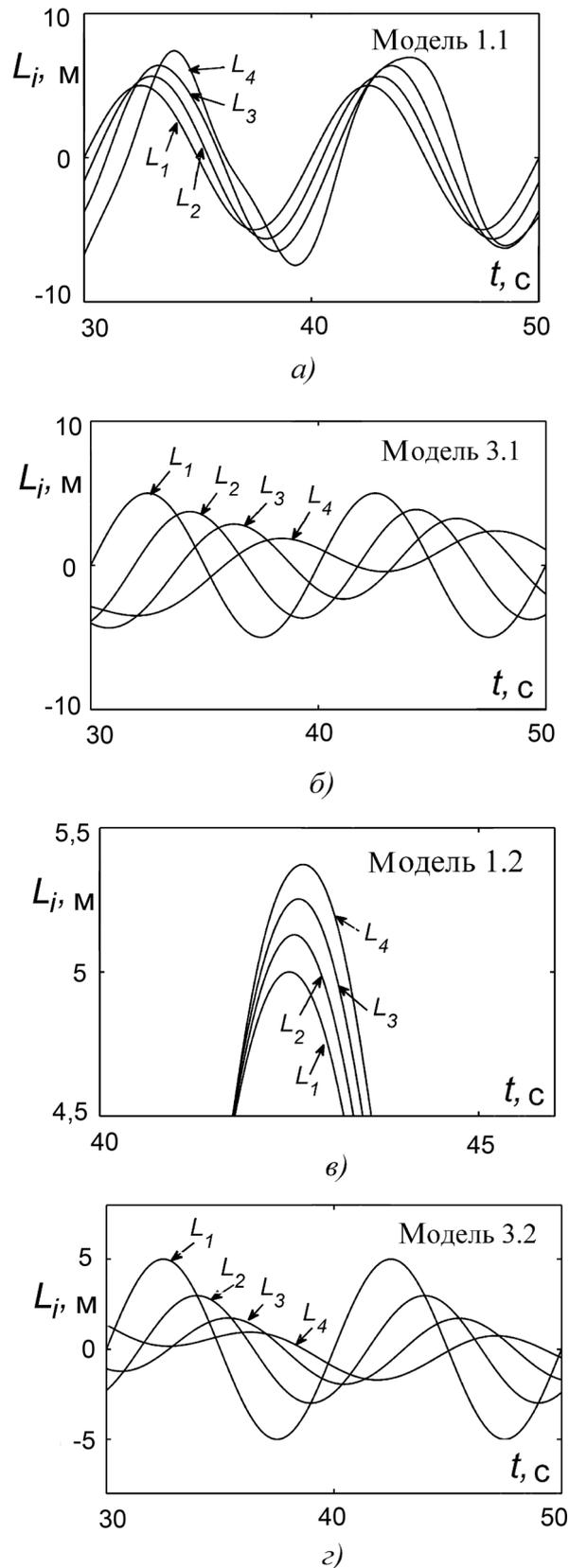


Рис. 2. Диаграммы путевых колебаний положения ТЕ при слежении для моделей 1.1, 3.1 и 1.2, 3.2

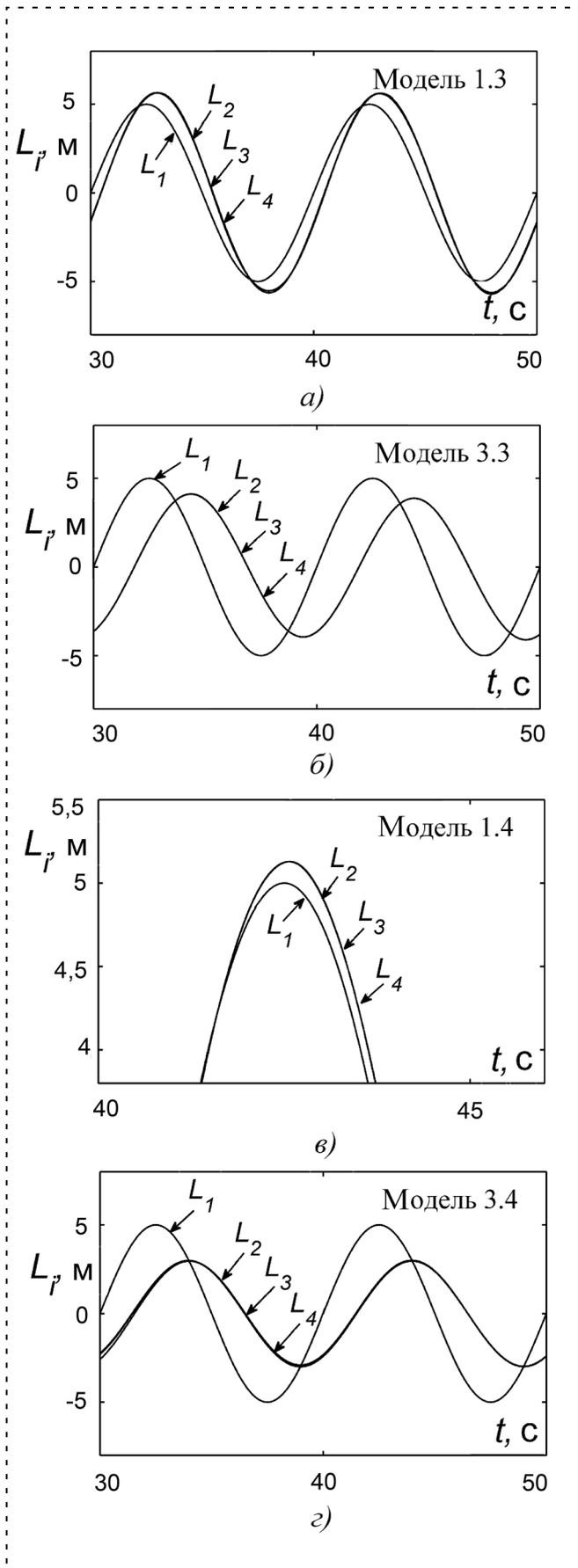


Рис. 3. Диаграммы путевых колебаний положения ТЕ при слежении для моделей 1.2, 3.2 и 1.4, 3.4

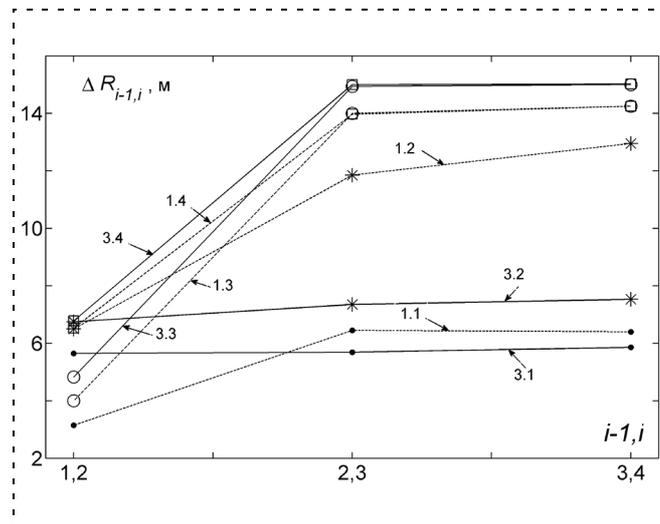


Рис. 4. Диаграммы минимальных расстояний между смежными (ТЕ_{i-1} и ТЕ_i) автомобилями после внезапной остановки головной ТЕ₁

записано в виде $W_4 = P(\hat{x}_4 + \hat{x}_3 + \hat{x}_2)$, соответственно $W_3 = P(\hat{x}_3 + \hat{x}_2)$.

Главная особенность рассматриваемых моделей состоит в том, что ТЕ₄ и ТЕ₃ точно повторяют движение ТЕ₂, при этом для модифицированного управления (рис. 3, б и 3, з) характерно снижение амплитуды колебаний всей колонны ТЕ по сравнению с головной ТЕ₁. Добавление измерений J_2 приводит к ожидаемому повышению качества слежения, что выражается в уменьшении ошибок (L_2, \dots, L_4 близки к L_1) слежения (рис. 3, б) и усилению способности модифицированного управления снижать амплитуду путевых колебаний (рис. 3, з).

На рис. 4 представлены диаграммы минимальных расстояний ($\Delta R_{i-1,i} = R_{i-1} - R_i$) между смежными ТЕ после внезапной остановки головного автомобиля. Из практики известно, что внезапная остановка автомобиля в потоке часто приводит к столкновению нескольких идущих за ним автомобилей. Рассматриваемые модели управления исключают подобную закономерность.

Наименьшие значения $\Delta R_{i-1,i}$ характерны только для пары ТЕ₁—ТЕ₂, при этом лишь модель 1.1 обладает наихудшими тормозными свойствами.

По мере усложнения моделей управления — добавления измерения J_2 (модель 1.2), введения модифицированного управления (модели 3.1, 3.2) и, наконец, расширения информационной базы (модели 1.3, 1.4 и 3.3, 3.4) — тормозные свойства моделей управления существенно улучшаются. Рассмотренные тормозные свойства в равной мере относятся к соответствующим моделям одностороннего управления (моделям 2.1—2.4).

Заключение

Основной результат исследований, изложению которого посвящена настоящая работа, состоит в разработке и численном моделировании структурированной системы моделей следящего управления движением автомобиля.

В практической плоскости полученные результаты можно рекомендовать для использования при создании автономных систем управления безопасным движением автомобилей различного назначения. При этом модели одностороннего ситуационного управления (2.1—2.4), предоставляя водителю свободу выбора движения, исключают возможность столкновения ТЕ. Модели линейного управления (1.3, 1.4) или модели ситуационного модифицированного управления (3.1—3.4), формируемого на основе расширенной информационной базы, наиболее эффективны для обеспечения устойчивого движения ТЕ в условиях насыщенного нестационарного городского движения, так как ука-

занные модели позволяют исключить в процессе слежения нарастание возмущения и столкновение в потоке транспорта. Например, модели модифицированного управления позволяют в процессе слежения снизить амплитуду путевых возмущений в колонне из четырех ТЕ не менее чем в два—три раза.

Список литературы

1. **Mirchandani Pitu, Wang Fei-Yue.** RHODES to intelligent transportation systems // IEEE Intell. Syst. 2005. Vol. 20. N 1. P. 10—15.
2. **Omar Manabu, Shimizu Hiroshi, Fujioka Takehiko.** GPS-based automatic driving control in local area with course of large curvature and parking space // Vehicle Syst. Dyn. 2004. Vol. 42, N 1. P. 59—73.
3. **Девятисильный А. С., Дорожко В. М.** Исследование задачи автоматического следования за лидером в системе двух транспортных единиц // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 2. С. 163—169.
4. **Патент РФ № 2225635.** Устройство следящего управления продольным движением автомобиля / Девятисильный А. С., Дорожко В. М. // Бюл. 2004. № 7.
5. **Дорожко В. М.** Оценка информационного признака начального этапа поворота морского судна // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 8. Приложение. С. 13—18.
6. **Мир** легковых автомобилей. Автокаталог. М.: За рулем, 1998. 384 с.

УДК 629.113.585

С. В. Ляхов, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,
М. М. Белоус, канд. техн. наук, нач. отдела,
Объединенный институт машиностроения
НАН Беларуси,
march@tut.by

Комплекс для исследования систем активной безопасности автомобиля

Представлен комплекс, предназначенный для исследования систем активной безопасности автомобиля. Приведены схема комплекса, его выполняемые задачи и описание работы, включающее работу программного обеспечения.

Ключевые слова: автомобиль, система активной безопасности, испытательное оборудование.

Введение

Разработка средств и технологий, обеспечивающих безопасную эксплуатацию автомобилей, играет все более важную роль в автомобилестроении. Одним из направлений работы в данной области является создание и применение систем активной безопасности (САБ), которые исключают неконтролируемое движение автомобиля. Объектом в исследовании здесь выступают автомобиль, движущийся по поверхности, обеспечивающей различные коэффициенты сцепления колес и элементы электронных систем управления. Результаты исследований

служат для разработки принципов регулирования и создания алгоритмов, которые будут заложены в системе управления.

Изучения свойств сцепления колеса с опорной поверхностью недостаточно для создания алгоритмов управления электронной системы, так как существует взаимное влияние на качество управления свойств отдельных узлов автомобиля и элементов электронной системы. Поэтому необходим синтез системы в целом. Проведение исследований в натурных условиях затруднено по нескольким причинам. Во-первых, требуется специализированный полигон со специальными дорожными покрытиями, которые обеспечивают различные коэффициенты сцепления колес с опорной поверхностью. Во-вторых, необходимо значительное количество человеческих и финансовых ресурсов, поскольку используются специально подготовленные автотранспортные средства и дорогостоящее измерительное оборудование. Получение необходимых данных при работе на подвижном объекте значительно усложнено, а обеспечить повторяемость результатов крайне трудно. Необходима разработка методов и средств, способных заменить натурные исследования на всех стадиях разработки систем активной безопасности, т. е. методов, которые в стендовых условиях позволили бы получить большинство необходимых данных для разработки системы.

Являясь одним из основных разработчиков систем активной безопасности в СНГ, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси уделяет особое внимание разработке методов и средств исследования САБ. Результатом таких работ явился универсальный комплекс по исследованию систем активной безопасности автомобиля с пневматической системой тормозов (рис. 1, см. третью сторону обложки), который позволяет проводить не только научные исследования, но и оценочные испытания опытных и серийно выпускаемых систем управления торможением.

Задачи комплекса, его структура и работа

Поскольку при разработке комплекса ставилась задача создания многофункционального устройства, комплекс построен из набора блоков и элементов, конфигурируемых под решение определенных задач, базовыми из которых являются:

- поиск алгоритмов и параметров управления САБ путем математического моделирования процесса торможения автомобиля и работы электронной системы на персональном компьютере;
- адаптация алгоритмов и параметров управления САБ к условиям работы реального электронного блока управления. Задача достигается нахождением оптимальных параметров торможения моделируемого на компьютере автомобиля, где

управление моделью осуществляется по сигналам с реального электронного блока;

- адаптация алгоритмов и параметров управления САБ к условиям работы реальной пневматической тормозной системы автомобиля. Математическая модель пневматической системы заменяется пневматическими аппаратами, при этом торможение автомобиля моделируется на компьютере. Обработка алгоритма управления торможением может осуществляться как реальным электронным блоком, так и компьютером;
- оценка параметров пневматических аппаратов тормозной системы автомобиля для возможности их использования в составе САБ.

Структура комплекса в конфигурации с пневматическим стендом представлена на рис. 2 и включает:

- персональный компьютер;
- блок интерфейса и сопряжения с имитаторами датчиков угловой скорости вращения колес и датчиками магнитного поля;
- блок управления и сбора информации с устройства управления элементами тормозной системы;
- пневматический стенд (пневматическая тормозная система автомобиля);
- источник питания 24 В;
- компрессор воздуха.

Пневматический стенд укомплектован элементами тормозной системы Минского автомобиль-

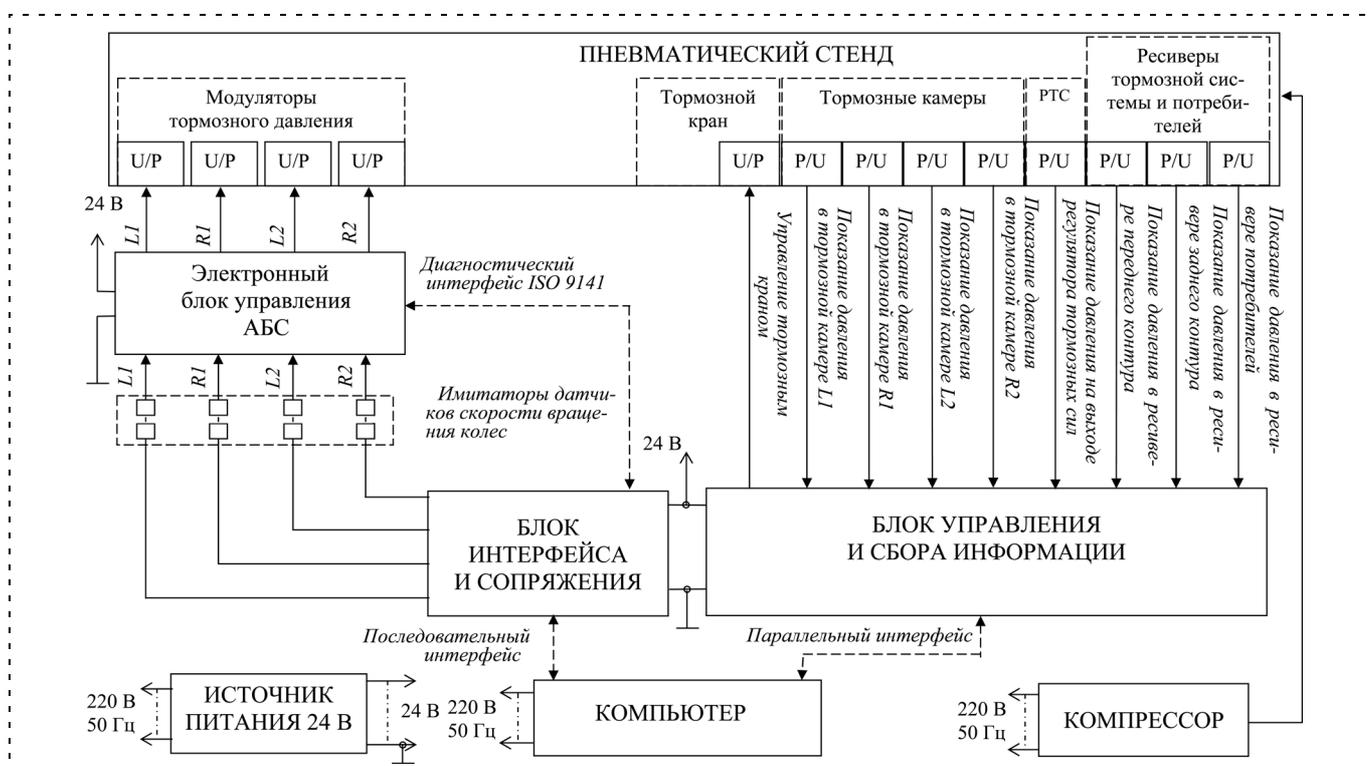


Рис. 2. Структура комплекса в конфигурации для работы в составе с пневматическим стендом

ного завода. Имитаторы датчиков скорости вращения колеса имеют реальные статоры датчиков, на которые наводится сигнал по принципу трансформатора, что обеспечивает максимально точную имитацию работы датчика. Датчики магнитного поля позволяют бесконтактным методом собирать информацию о наличии управляющих сигналов на электромагнитных катушках модуляторов тормозного давления, что обеспечивает реальные режимы работы электрических цепей электронного блока.

Комплекс работает следующим образом. Проводится заполнение сжатым воздухом ресиверов пневматического стенда. Персональный компьютер вычисляет значения скоростей колес автомобиля и передает их по последовательному интерфейсу блоку интерфейса и сопряжения, который формирует сигналы датчиков скорости вращения колес и передает их электронному блоку управления. Одновременно персональный компьютер формирует и передает по параллельному интерфейсу команды управления блоку управления и сбора информации, который управляет элементами тормозной системы, например, тормозным краном и регулятором тормозного давления. Электронный блок управления формирует команды управления и передает их модуляторам тормозного давления, которые изменяют уровни давлений в тормозных камерах пневматической системы. Блок управления и сбора информации собирает и передает компьютеру по параллельному интерфейсу значения уровней давлений воздуха в тормозной системе. По полученным данным персональный компьютер выполняет новый расчет значений скоростей колес автомобиля. Цикл обработки и передачи информации составляет около 1 мс. Периодически проводится оценка правильности самодиагностики системы путем считывания диагностической информации [1] из электронного блока через блок интерфейса и сопряжения.

Имея возможность работы непосредственно с реальными элементами пневматической тормозной системы автомобиля и электронного блока управления, можно корректировать их математические модели, приближая к реальным устройствам, что повышает качество разрабатываемых алгоритмов управления. Для оценки эффективности алгоритма управления и самодиагностики системы достаточно использовать компьютерный исследовательский комплекс с математическим имитатором пневматической тормозной системы, на который передаются длительности сигналов, поступающие на модуляторы тормозного давления от электронного блока управления через блок интерфейса и сопряжения. Такой режим работы комплекса позволяет

более мобильно проводить отладку алгоритма блока управления.

Программа моделирования написана в среде Delphi 5 с использованием стандартных модулей и специально разработанного модуля, который служит для обеспечения обмена данными по последовательному и параллельному интерфейсу с учетом цикла вычислений математической модели [2, 3].

Отработка алгоритма управления САБ при работе комплекса строится на основании рассматриваемых элементов и связей при исследовании САБ, представленных на рис. 3, где в качестве обратной связи для каждого колеса автомобиля выступает система "автомобиль—колесо—дорога", объединенная общей системой уравнений движения автомобиля. За основу оцениваемых параметров торможения взяты параметры правил ЕЭК ООН № 13 [4], которые регламентируют работу тормозной системы, оборудованной антиблокировочной системой тормозов.

Интерфейс ввода параметров для проведения расчета выполнен в виде закладок, включающих массогабаритные характеристики автомобиля и следующие параметры:

- дорожного покрытия: длины участков дорог и их коэффициенты сцепления под правыми и левыми колесами автомобиля;
- пневматической тормозной системы автомобиля: начальные значения давлений воздуха в ресиве-

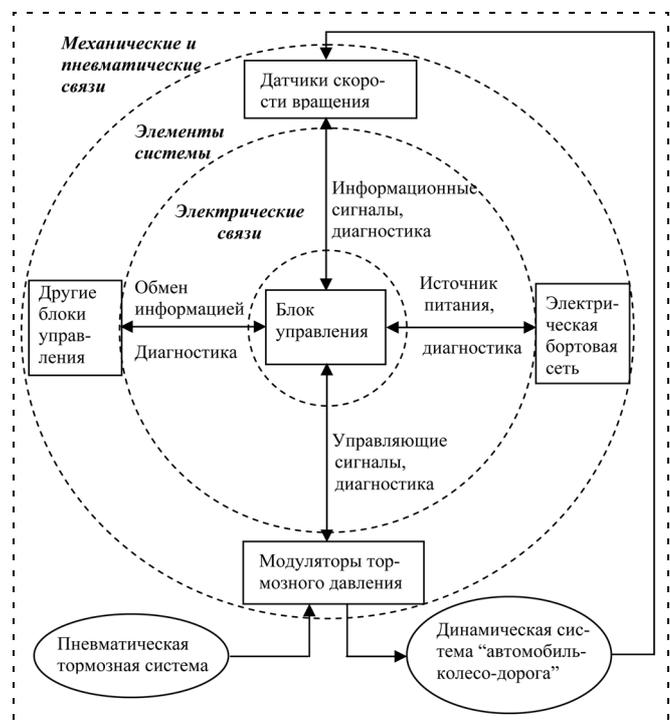


Рис. 3. Рассматриваемые элементы и связи при исследовании системы активной безопасности

рах, времена срабатывания контуров тормозной системы и модуляторов тормозного давления, задержка работы между передним и задним тормозным контуром;

- тормозных механизмов (характеристика гистерезиса);
- регулятора тормозных сил;
- алгоритмов управления антиблокировочного режима: тип алгоритма, пороги срабатываний по уровню проскальзывания и ускорения колес, длительности и число подкачек воздуха;
- пневмобаллонов подвески: длина, эффективное сечение пневмобаллонов, начальные уровни подвески и соотношения рычагов подвески (интерфейс ввода данных параметров показан на рис. 4);
- амортизаторов подвески;
- колес автомобиля: давление воздуха в шинах, ширина и статический радиус шин, характеристики сопротивления и жесткости баллонов шин, моменты инерции;
- рамы автомобиля: длины лонжеронов и поперечин, коэффициенты жесткости и моменты инерции их сечений.

Комплексом определяются следующие параметры:

- время торможения, длина тормозного пути автомобиля;
- среднее и мгновенное ускорение автомобиля, его колес;

- эффективность торможения [4];
- расход воздуха тормозной системой;
- средняя и мгновенная степень проскальзывания колес автомобиля;
- значения давлений в тормозных камерах автомобиля и ресиверах;
- длительности и последовательности вырабатываемых команд управления на модуляторах тормозного давления;
- амплитуды и ускорения поддресоренных и неподдресоренных масс.

На рис. 5 показан интерфейс вывода графической информации, где представлен график скоростей колес и автомобиля при торможении, а также график изменения уровней давления воздуха в пневмобаллонах подвески автомобиля.

Однако вычисление значений параметров модели автомобиля и его торможения не может быть непосредственно использовано для полунатурного моделирования без программы, которая бы обеспечивала работу аппаратной части комплекса.

Для управления аппаратной частью комплекса и вычисления параметров модели автомобиля и его торможения используется программа, которая регламентирует по времени вычисления, управление последовательным портом компьютера и прием-передачу данных с блоком интерфейса и сопряжения. Структура алгоритма оптимизирована с учетом наименьшего затраченного времени на вычисле-

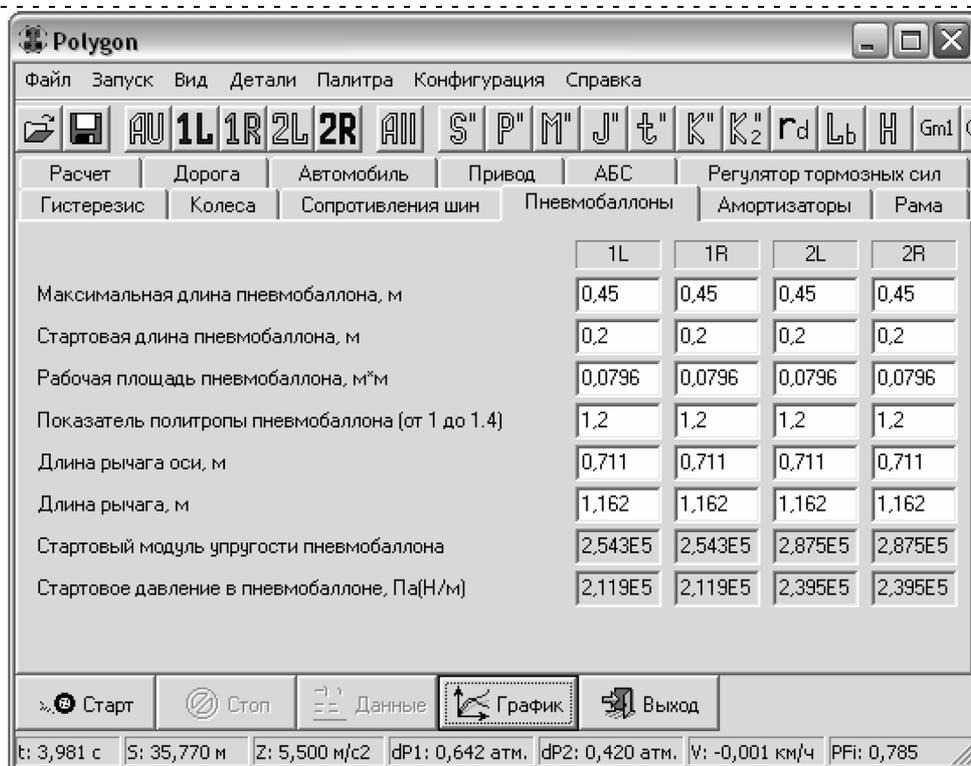


Рис. 4. Интерфейс ввода параметров для проведения расчета, открытый на пункте "Пневмобаллоны"

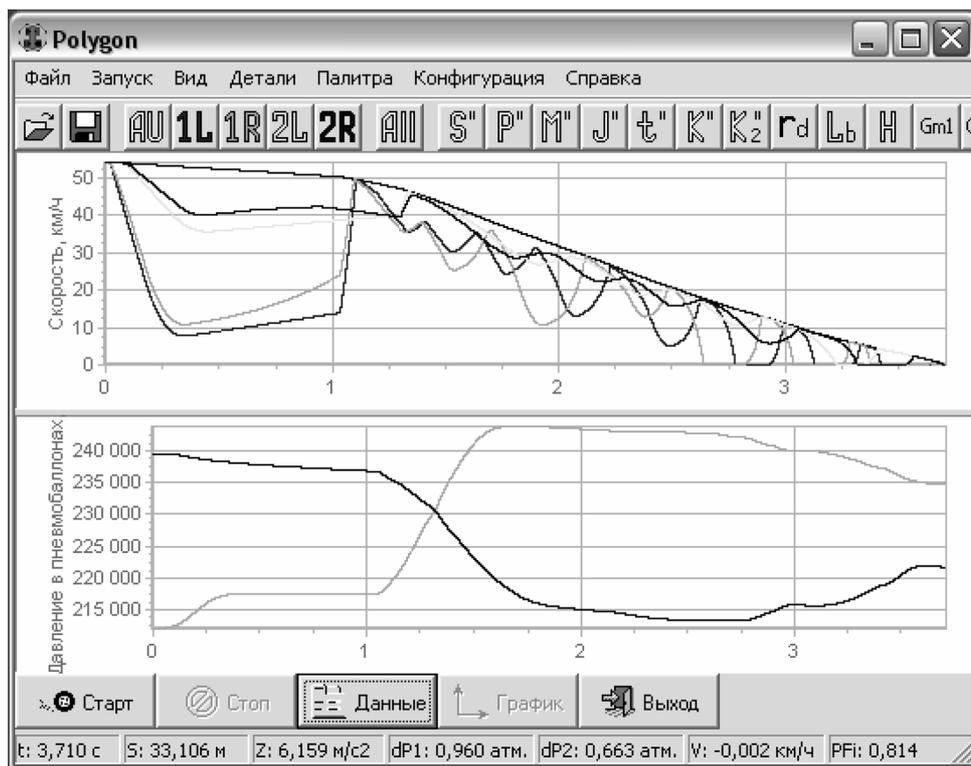


Рис. 5. Интерфейс вывода графической информации

(На верхнем графике показаны процессы изменения скорости автомобиля и его колес при торможении, на нижнем — уровни давлений в пневмобаллонах)

ния и передачу данных, что необходимо для организации режима реального времени. Для этого все вычисления, не участвующие в цикле обработки данных, проводятся заранее и далее используются по необходимости, а значение скорости колеса автомобиля по модели вычисляется параллельно с передачей значения скорости другого колеса по последовательному каналу передачи информации блоку интерфейса и сопряжения.

Заключение

Разработанный комплекс может использоваться не только для исследований, но и позволяет без предварительных натурных испытаний подготовить разрабатываемую систему к установке на автомобиль. При этом проведение натурных испытаний минимизируется использованием результатов стендовых испытаний. Многофункциональность комплекса и сокращение времени оценки параметров системы делают проведение испытаний максимально эффективными и малозатратными.

Хотя комплекс разработан недавно, он опробован для решения ряда задач. Так, в рамках Государственной комплексной программы научных исследований "Механика" (Республика Беларусь) было про-

ведено математическое моделирование режимов торможения автомобиля с антиблокировочной системой тормозов для доэкстремальных алгоритмов управления (работающих на восходящем участке кривой сцепления колеса с опорной поверхностью), а также взаимного влияния параметров работы пневматической подвески автомобиля и тормозной системы. Проведена адаптация алгоритмов управления программного обеспечения электронных блоков уже выпускаемых антиблокировочных систем на НПРУП "Экран" (г. Борисов, Беларусь) и исследованы параметры пневматических элементов для новой, разрабатываемой системы боковой устойчивости автомобиля.

Список литературы

1. ISO 9141-89. Транспорт дорожный. Системы технического диагностирования. Требования к обмену цифровой информацией.
2. Ляхов С. В., Миронович Д. С. Разработка программной части комплекса полунатурного моделирования работы АБС // Сб. тр. молодых ученых Национальной академии наук Беларуси. Т. 4. Мн.: ИП "Логвинов", 2004. С. 248—251.
3. Ляхов С. В., Миронович Д. С. Программа моделирования колебаний подвески автомобиля, оборудованного АБС // Весці Нацыянальнай акадэміі навук. Сер. фізіка-тэхніч. навук. 2005. № 5. С. 100—103.
4. Правила ЕЭК ООН № 13 поправка 09. Единые предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств, в отношении торможения.

УДК 621.01,681.326

В. В. Морозов, д-р техн. наук., проф.,

А. В. Жданов, канд. техн. наук, доц.,

Л. В. Беляев, аспирант,

Владимирский государственный университет,
mtf@vlsu.ru

Разработка мехатронного модуля имплантируемой системы искусственного сердца и его лабораторно-стендовые испытания

Предлагается конструкция мехатронного модуля имплантируемой системы искусственного сердца. Приведены особенности конструкции модуля и системы управления, дано описание опытного образца и результаты его лабораторно-стендовых испытаний.

Ключевые слова: мехатронный модуль, искусственное сердце, система управления, кровообращение, бесконтактный моментный двигатель, вентильный двигатель, гидродинамические испытания, микроконтроллер.

В последние десятилетия параллельно с трансплантацией бурно развивается одно из новых направлений в технике и медицине — создание искусственных органов, в частности, искусственного сердца. В решении этой проблемы можно выделить два основных направления [1]: *постоянная замена* естественного сердца протезом, полностью выполняющим насосную функцию сердца и способного длительные годы поддерживать кровообращение, — искусственным сердцем (ИС); *временная замена* на период лечения сердца до восстановления его функциональной способности. К последнему направлению относятся методы временной помощи сердцу и выполнения его нагнетательной функции механическими устройствами — использование вспомогательного кровообращения (ВК). ВК осуществляется с помощью механических устройств, подключаемых к сердечно-сосудистой системе и функционирующих параллельно с естественным сердцем до восстановления адекватной сократительной способности миокарда. В настоящее время нашли клиническое применение системы американского, немецкого и японского производства, в частности,

Heart Mate LVAD, Thoratec VAD, Novacor LVAD, AbioCor, Arrow LionHeart, INCOR и др. [2, 3].

Наиболее сложной проблемой является создание систем ИС, поскольку в этом случае система работает независимо от естественного органа более длительный период. Применение систем ИС в клинической практике ставит задачу создания имплантируемых устройств, способных длительное время обеспечивать кровообращение с заданной гемодинамикой. Их создание, в свою очередь, основано на применении компактных и надежных механизмов и приводов, способных длительно поддерживать кровообращение в условиях ограниченного теплоотвода и длительного контакта с кровью. Деятельность сердца протекает в виде периодически повторяющихся циклов. В каждом цикле происходит сокращение желудочка и изгнание крови из него (систола) и расслабление желудочка и наполнение сердца (диастола). В терминах технической механики это означает, что выходные элементы привода ИС должны совершать возвратно-поступательное движение с частотой 1...2 Гц (соответствует пульсу 60...120 мин⁻¹), преодолевая усилие на штоке около 100 Н (соответствует давлению 120 мм рт. ст.).

Мехатронные модули (ММ) наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к таким устройствам. Это объясняется более высоким КПД, меньшими массогабаритными характеристиками, большей надежностью и долговечностью по сравнению с гидро- и пневмоустройствами. Применение ММ позволяет создавать автономные компактные системы ИС вместо стационарных центров. Предлагаемый ММ привода ИС выполнен на базе бесконтактного моментного двигателя на постоянных магнитах, в полый ротор которого встроен механический преобразователь вращательного движения в возвратно-поступательные циклические перемещения выходного штока — планетарный роликвинтовой механизм (РВМ). Электрическая машина работает в режиме вентильного двигателя, при этом электронная коммутация обмоток фаз обеспечивается датчиком положения ротора (ДПР), выполненного на элементах Холла. Многопарность контакта в сопряжениях резьб РВМ позволяет получить высокие характеристики по нагрузочной способности, жесткости, редукации и КПД

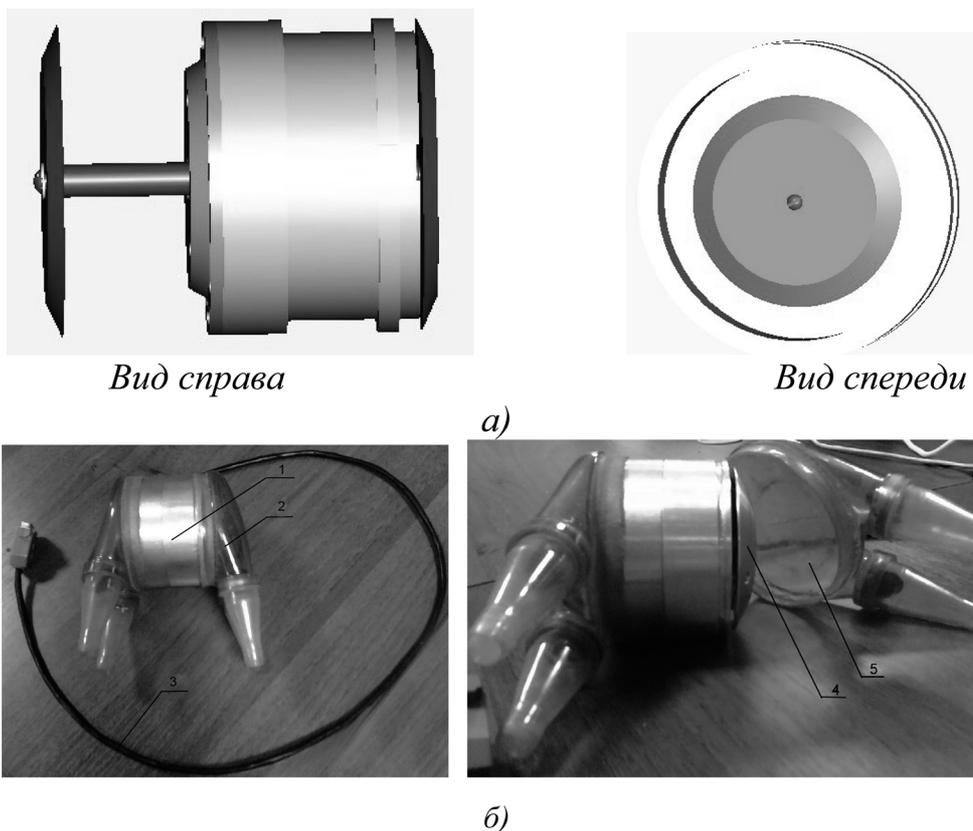


Рис. 1. Имплантируемый привод системы ИС:

a — твердотельная модель мехатронного модуля привода системы ИС (Pro/ENGINEER WF3); *б* — внешний вид имплантируемого привода системы ИС:

1 — электромеханический модуль, 2 — искусственный желудочек сердца, 3 — кабель для подключения системы управления, 4 — толкатель, 5 — мембрана ИЖС

при малых массе и габаритных размерах и короткой кинематической цепи.

В крайних положениях ход штока ограничен конечными выключателями на базе элементов Холла, что позволило приблизить габаритные размеры всего привода к естественным размерам сердца. К хвостовикам винта крепятся толкатели, которые воздействуют на мембраны искусственных желудочков сердца (ИЖС). Возвратно-поступательное движение мембран создает давление для перекачивания крови. Исполнение привода в виде модуля значительно улучшает характеристики всего устройства системы ИС. Конструкция ММ выполнялась в сквозной системе проектирования Pro/ENGINEER WF3. Внешний вид модуля представлен на рис. 1 [4].

Основной проблемой при создании систем ИС является уменьшение толщины ММ. В табл. 1 представлены сравнительные характеристики имплантируемых блоков аппаратов ИС.

Предлагаемый ММ обеспечивает ресурс непрерывной работы в течение 10 тыс. часов при частоте пульсации 60...120 циклов в минуту; ход штока ± 10 мм при максимальной усилении 100 Н; питание привода от аккумуляторных батарей с напряжением 12 В. От-

Таблица 1

Сравнительные характеристики имплантируемых блоков аппаратов ИС

Параметр	<i>Baylor Medical Center, США</i> [3]	Yamagata University, Япония [2]	Предлагаемый вариант
Диаметр, мм	97	90	92
Толщина, мм	73	82	76
Объем ИЖ, мл	510	400	500
Масса, г	Нет сведений	740	660
Максимальная производительность, л/мин	8	7,5	5,5 (при 100 циклах в мин)
КПД	Нет сведений	20	35

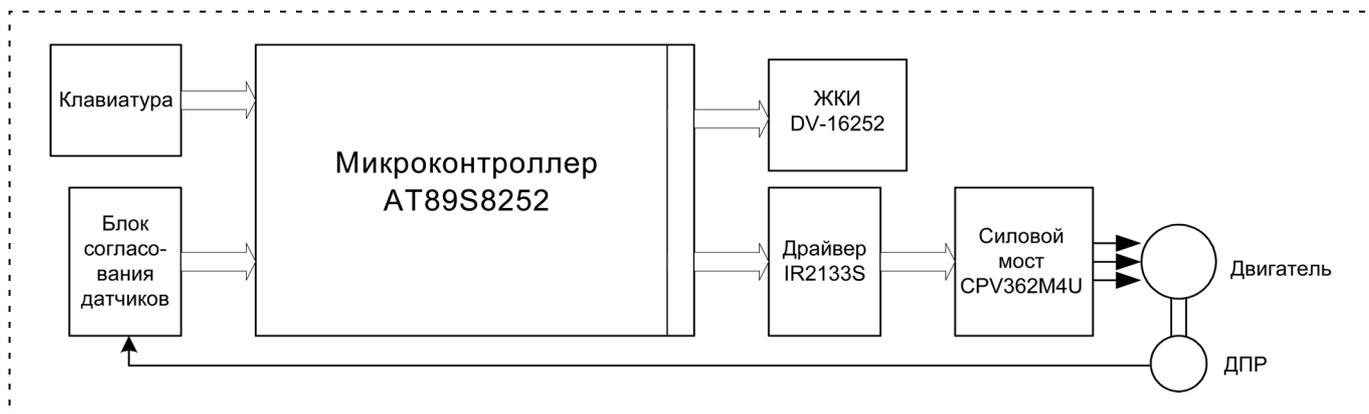


Рис. 2. Функциональная схема СУ ММ привода ИС

личительными особенностями устройства являются пониженные виброактивность и создаваемый шум.

Разработанная система управления (СУ) ММ привода ИС состоит из следующих функциональных узлов: управляющая микроЭВМ, блок управления электродвигателем и пульт управления. Функциональная схема системы управления представлена на рис. 2.

В качестве управляющей микроЭВМ используется однокристалльный восьмиразрядный микроконтроллер AT 89S8252, производимый фирмой ATMEL. Основная задача микроконтроллера (МК) — управление двигателем по заданному алгоритму. В приводе используется бесколлекторная синхронная трехфазная машина, работающая в режиме вентильного двигателя. Для коммутации обмоток двигателя применен силовой трехфазный транзисторный мост CPV362M4U. Мостовое соединение ключей и обмотки двигателя позволяет получать биполярное напряжение на обмотке при однополярном источнике питания. В качестве таких ключей используются мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT.

Хорошие токовые характеристики биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT и их высокие частотные свойства позволяют питать двигатель при несущей частоте широтно-импульсной модуляции (ШИМ) 16...20 кГц. Для согласования управляющих выходных сигналов микроконтроллера с входами силового моста применен драйвер IR2133S (International Rectifier), который выполняет функцию защиты от перегрузок по току. В качестве датчика силы тока используется шунт. При превышении силы тока допустимого предела драйвер закрывает транзисторные ключи и отключает двигатель, выдавая информацию об аварийном состоянии в МК.

Коммутация обмоток двигателя осуществляется в последовательности, определяемой положением

постоянных магнитов ротора относительно фазных обмоток статора. Эта информация снимается с фаз U , V , W тремя ДПР, выполненными на датчиках Холла, которые установлены непосредственно на электродвигателе. Сигналы с датчиков поступают на входы МК. МК по полученной информации с ДПР осуществляет выдачу управляющих сигналов на драйвер силового моста для соответствующей коммутации обмоток двигателя. Схема включает элементы, которые служат для организации прерывания программы при изменении состояния ДПР, чтобы освободить МК от постоянного опроса состояний ДПР.

Изменение направления вращения двигателя осуществляется по сигналам с конечных выключателей. Они также работают в режиме прерывания. Для регулирования частоты вращения МК в соответствии с запрограммированным алгоритмом генерирует ШИМ-сигналы для силовых ключей. В начале работы (при включении СУ) осуществляется настройка аппаратных и программных устройств МК (таймера, портов ввода-вывода, системы прерываний, внутренних регистров). Далее СУ переходит в режим управления двигателем, а также ожидания приема команды от пульта управления.

На рис. 3 показан пульт управления, который состоит из кнопочного пульта из 16 клавиш (10 цифровых и 6 функциональных) и двухстрочного алфавитно-цифрового жидкокристаллического индикатора (ЖКИ) DV-16252, на который выводится информация о режимах работы искусственной системы ВК (производительность насоса, л/мин; объем выброса, мл; необходимость подзарядки батарей), значения параметров управления (частота сердечных сокращений, мин^{-1} ; отношение систола/диастола). С помощью клавиатуры возможно изменение этих параметров.

В целях экспериментальной проверки эффективности насосной функции разработанной конст-

Результаты гидродинамических испытаний ММ привода ИС

Давление на выходе, мм рт. ст.	Производительность, л/мин	
	Левый желудочек	Правый желудочек
Частота 60 уд/мин		
60	3,2	3,0
80	2,8	2,7
100	2,7	2,6
120	2,5	2,3
Частота 80 уд/мин		
60	4,7	4,4
80	4,2	4,0
100	4,0	3,8
120	3,8	3,5
Частота 100 уд/мин		
60	5,5	5,1
80	5,3	5,1
100	4,8	4,4
120	4,0	3,8

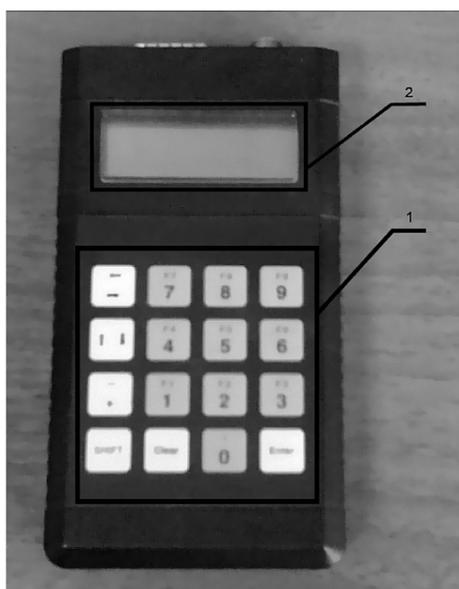


Рис. 3. Внешний вид пульта СУ:
1 — кнопочный пульт; 2 — ЖКИ

рукции ММ привода ИС был проведен комплекс испытаний. Определение производительности ИС проводилось на двухконтурном гидродинамическом стенде, имитирующем большой и малый круги кровообращения, каждый контур которого состоит из двух резервуаров. Один заполняется дистиллированной водой с 10 %-ным содержанием физиологического раствора, что необходимо для получения показаний электромагнитного расходомера. В другом создается вакуум для обеспечения начального противодействия. Для визуального контроля процесса стенд выполнен из прозрачного материала (оргстекла). В состав стенда также входят входная и выходная магистрали переменного гидравлического сопротивления и регистрирующая аппаратура (датчики давления, электромагнитные расходомеры). При проведении гидродинамических испытаний изменялось давление на выходе, частота пульсации и измерялась производительность. Результаты гидродинамических испытаний сведены в табл. 2.

Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что разработанная конструкция модуля удовлетворяет медико-техническим требованиям,

обеспечивая требуемые характеристики. Исследование в целях дальнейшего увеличения производительности ММ можно проводить в нескольких направлениях: разработка ИЖС с увеличенным ударным выбросом (сокращение паразитных объемов, увеличение рабочей камеры, устранение зон стагнации и турбулентности), повышение удельных силовых характеристик ММ (повышение КПД механических частей, увеличение мощности электродвигателя и др.), совершенствование СУ ММ.

Список литературы

1. Морозов В. В., Жданов А. В., Новикова Е. А., Новикова Ю. А., Костерин А. Б. Имплантируемая система вспомогательного кровообращения на базе мехатронных модулей. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2006. 134 с.
2. Okamoto K., Hashimoto T., Mitamura Y. Design of miniature implantable left ventricular assist device using CAD/CAM technology // Journal of Artificial Organs, 2003. Vol. 6. P. 162–167.
3. Honda N. et al. Ultracompact, completely permanent use electromechanical ventricular assist device and total artificial heart // Artificial Organs. 1999. Vol. 23. N 3. P. 253–261.
4. Морозов В. В., Жданов А. В. Использование технологий быстрого прототипирования при создании искусственных желудочков сердца и систем вспомогательного кровообращения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 11. С. 30–31.

А. В. Бушманов, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Дрюков, ассистент,
 Амурский государственный университет,
 aleksandr-dryukov@yandex.ru

Имитационное моделирование процессов компрессии и дистракции отломков костей аппаратом остеосинтеза

Представлена имитационная модель системы управления процессами дистракционного и компрессионного остеосинтеза с помощью аппарата незамкнутого типа.

Ключевые слова: дистракция, компрессия, остеосинтез, репозиция, система аппарат—кость, система измерения, фиксирующий аппарат.

Введение

В современной травматологии для репозиции костных фрагментов и фиксации переломов широкое применение находят аппараты внешнего остеосинтеза незамкнутого типа. При остеосинтезе костей таза такие аппараты позволяют фиксировать фрагменты кости, их особенностями являются наличие незамкнутой рамы и врезных стержней. Обычно эти аппараты применяются для лечения относительно стабильных переломов, при которых тазовое кольцо повреждено и незамкнуто. Известно, что основной задачей остеосинтеза является устранение

смещения, с последующей компрессией и удержанием костных отломков [1, 2].

На тазовое кольцо действуют силы прикрепленных к нему мышц, силы гравитации и давления внутренних органов [2]. Величина и направление сил зависят от вида двигательной активности человека и положения его тела. В здоровом состоянии тазовая кость служит опорой внутренних органов и основанием для крепления мышц. В случае перелома тазовое кольцо как часть опорно-двигательного аппарата не способно выполнять свои функции. Поэтому в целях восстановления и поддержания функций тазового кольца необходимо компенсировать негативные изменения его конструктивного состояния путем репозиции и дозированной компрессии.

В настоящее время репозиция и регулирование величины компрессии и дистракции посредством аппаратов остеосинтеза проводятся врачами-ортопедами, как правило, вручную при визуальной оценке состояния перелома. Очевидно, что визуальный осмотр как способ определения перемещения и величины компрессии неточен, поэтому необходимо создание автоматизированной системы измерения и регулирования компрессии и дистракции отломков на базе современных программно-технических средств.

Известны разработки автоматизированных аппаратов остеосинтеза, позволяющих осуществлять процесс дистракции при переломах длинных костей методом Илизарова: Paley 1991, Шевцов В. И. и др.

1995 [3], Козырев В. В. и др. [4]. Также известна разработка аппарата, обеспечивающего автоматическую дозированную компрессию между отломками для стабильных переломов костей таза [5].

Целью данного исследования является имитационное моделирование процессов компрессии и дистракции костных отломков с помощью системы управления компрессирующим аппаратом незамкнутого типа в среде SimulinkMatLab.

Особенности системы остеосинтеза

Разработана модель фиксирующего аппарата, позволяющего создавать дозированную компрессию и репозицию при лечении переломов тазового кольца (рис. 1) [6].

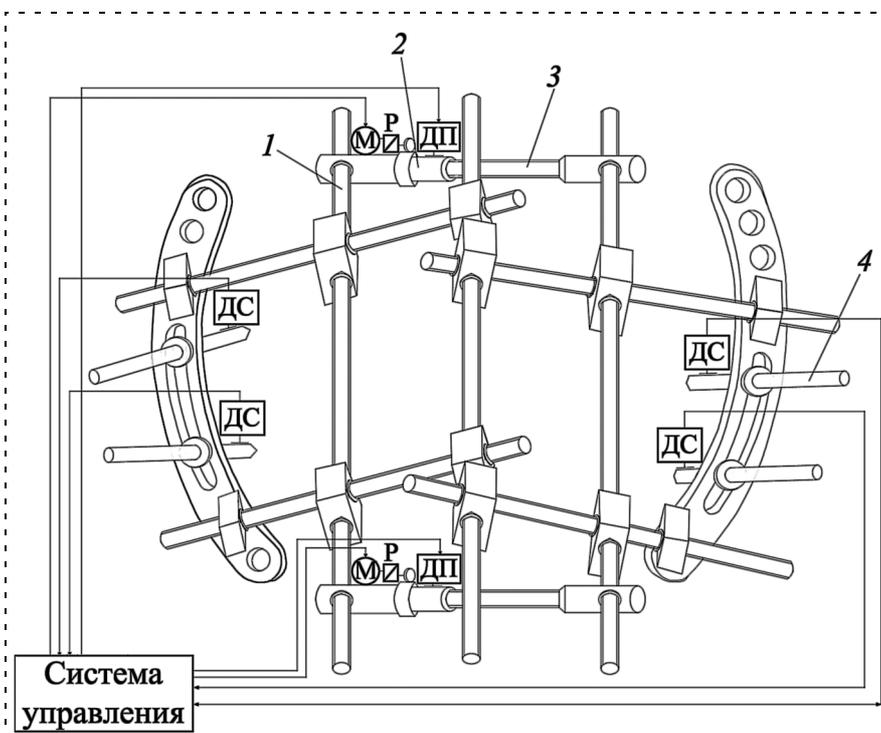


Рис. 1. Механизм фиксирующего аппарата остеосинтеза

Принцип действия аппарата заключается в том, что двигатель М посредством редуктора Р передает вращательное движение втулке 2, втулка и резьбовая штанга 3 образуют винтовую передачу, при вращении втулки в нее вворачивается резьбовая штанга и меняется длина между опорными стержнями 1 (рис. 1). Изменение этой длины дает возможность проводить репозицию костных фрагментов, закрепленных на резьбовых фиксирующих стержнях 4 и изменять компрессию или дистракцию между ними.

Особенностью и новизной разработки является то, что автоматизированное устройство представляет собой аппарат незамкнутого типа для фиксации и репозиции фрагментов кости для стабильных переломов при лечении переломов костей таза.

На основании известных значений репозиции и компрессии, а также с использованием характеристик технических средств системы управления аппаратом требуется разработать имитационную модель системы управления процессами дистракционного и компрессионного остеосинтеза.

Структура системы управления фиксирующим аппаратом

Структурная схема системы управления фиксирующим аппаратом показана на рис. 2. Сигналы с датчиков силы ДС, установленных на резьбовых фиксирующих стержнях 4 (см. рис. 1), поступают на аналоговые входы программируемого логического контроллера. Сигналы с датчиков перемещения ДП, установленных на втулках 2 (см. рис. 1), поступают на цифровые входы контроллера. Управляющий сигнал поступает с дискретного выхода кон-

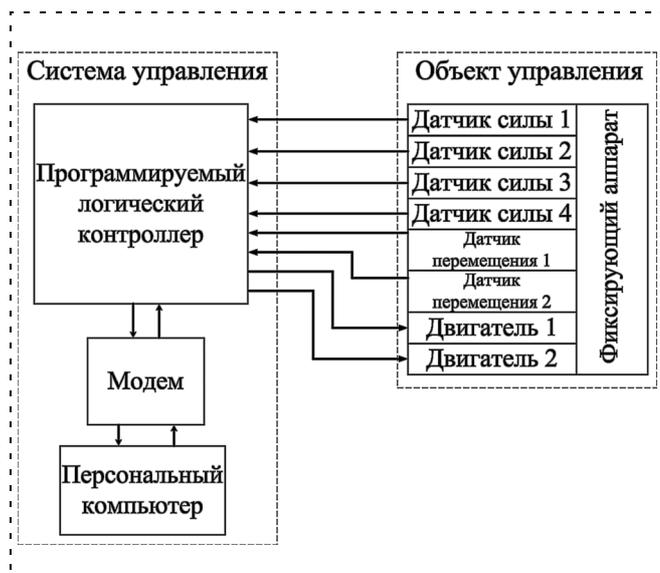


Рис. 2. Структурная схема системы управления фиксирующим аппаратом остеосинтеза

троллера на схему питания двигателя, включая и отключая его. Программа управления загружается в контроллер с персонального компьютера.

Отличие системы управления для процесса компрессионного остеосинтеза от системы управления для процесса дистракционного остеосинтеза заключается в том, что при компрессионном остеосинтезе регулируется значение силы между костными отломками, а при дистракционном — периодическое перемещение костных отломков. Структурное отличие этих систем заключается в том, что при дистракционном остеосинтезе контроллером обрабатываются входные сигналы, поступающие только с датчиков перемещения, а при компрессионном — с датчиков силы и перемещения.

Известно [3], что при дистракционной репозиции костных отломков их ежедневное перемещение зависит от времени, прошедшего с момента травмы, и составляет от 2 мм в сутки в первые 10 дней и до 1 мм в сутки в последующие дни. Репозиция должна проводиться периодически. Исследования показали, что ежедневное перемещение по 1/4 мм за 4—6 циклов, чаще всего осуществляемое на практике, не является оптимальным [1, 3]. При этом режиме в костном регенерате обнаруживают участки кровоизлияний, дегенеративно-дистрофические изменения, которые могут вызвать замедленное костеобразование. Изучение влияния круглосуточной дистракции с дискретностью 60 циклов показало, что она не приводит к появлению болей и функциональным расстройствам нервно-мышечного аппарата [1, 3]. При такой дискретности оптимальное среднее значение удлинения в сутки возрастает от 1,0 до 1,5 мм и сопровождается более активным восстановительным процессом. При этом перестройка костного регенерата происходит быстрее, а мягкие ткани, подвергаясь более постепенному и равномерному растяжению, оказывают меньшее сопротивление.

Таким образом, при компрессионном остеосинтезе необходимо обеспечить два определяющих фактора, которые влияют на восстановительные реакции в месте перелома, — стабильность и компрессию. Известно, что для компрессионного остеосинтеза смещение при репозиции за один цикл не должно превышать 0,01 мм [3].

Математические модели системы измерения и двигателя

Система измерения компрессии между костными отломками основана на тензометрическом принципе, при ее разработке спроектированы мостовые схемы подключения датчиков, крепящихся к фиксирующим стержням. Математическая модель тензометрической системы измерения механического

напряжения в стержне аппарата остеосинтеза [6, 7] включает в себя:

- зависимость изменения сопротивления чувствительного элемента тензодатчика ΔR от относительной деформации стержня ε

$$\Delta R(\varepsilon) = ((\varepsilon + 1)^{K_{\text{рас}}} - 1)R_H, \quad (1)$$

где $K_{\text{рас}}$ — расчетный коэффициент чувствительности тензодатчика; R_H — начальное сопротивление тензорезистора;

- зависимость выходного напряжения V_0 с изменительной мостовой схемы от относительного изменения сопротивления чувствительного элемента тензодатчика $\Delta R_{\text{отн}}$

$$V_0(\Delta R) = \left(\frac{-\Delta R}{2R_H + \Delta R} \right) V_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{вх}}$ — входное напряжение, подаваемое на мостовую схему;

- зависимость силы, действующей на стержень, от выходного напряжения тензометрической мостовой схемы

$$F(V_0) = \frac{E}{\pi r^2} \left(K_{\text{рас}} \sqrt{-\frac{2V_0}{V_0 + V_{\text{вх}}} + 1} - 1 \right), \quad (3)$$

где r — радиус сечения фиксирующего стержня.

Определив силу, действующую на стержень, и зная расположение стержней относительно фрагментов кости, вычисляем значение компрессии между отломками.

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением представлен в виде апериодического звена второго порядка, выходом которого является угловая скорость [8, 9]. Передаточная функция данного звена

$$W(p) = \frac{1/K_e}{T_M T_{\text{я}} p^2 + T_M p + 1}, \quad (4)$$

где $T_M = \frac{RJ}{K_M K_e}$ — электромеханическая

постоянная времени двигателя; R — активное сопротивление якорной цепи; J — момент инерции вращающихся элементов двигателя; K_M — коэффициент пропорциональности между вращающим моментом и током якоря; K_e — коэффициент пропорциональности между обратной ЭДС и скоростью вращения двигателя; $T_{\text{я}} = \frac{L}{R}$ — электромагнитная постоянная времени двигателя; L — индуктивность якорной цепи.

Моделирование

- ♦ **Имитационное моделирование системы при дистракционном остеосинтезе.** При использовании режима управления для дистракционного остеосинтеза необходимо совершать репозицию костных отломков 60 раз в сутки, т. е. желательно каждые 24 минуты автоматически проводить репозицию на $0,017 \pm 0,008$ мм [3].

Для осуществления репозиции костных отломков в конструкции аппарата применяется механизм с электроприводом, а для обеспечения обратной связи по перемещению используется датчик перемещения ДП.

На рис. 3 приведена имитационная модель этой системы, созданная в среде Simulink-MatLab, состоящая из нескольких блоков. Первый блок представлен в виде схемы модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, описываемой уравнением (4). Второй блок, цилиндрический зубчатый редуктор, с коэффициентом усиления K_1 , представлен в виде безынерционного звена; третий блок, винтовая передача с коэффициентом усиления K_2 , — в виде безынерционного звена; четвертый блок, датчик перемещения, — в виде интегрирующего звена.

На вход системы подается питающее напряжение якоря $U_{\text{я}}$, на выходе получаем перемещение фиксирующих стержней и закрепленных на них фрагментов кости относительно друг друга l (рис. 3). Возмущающим воздействием является момент сопротивления на валу двигателя, возникающий в движущихся частях исполнительного механизма за счет сил трения и упругости, а также механических сил, передаваемых через элементы фиксирующего устройства мышцами и связками. Момент сопротив-

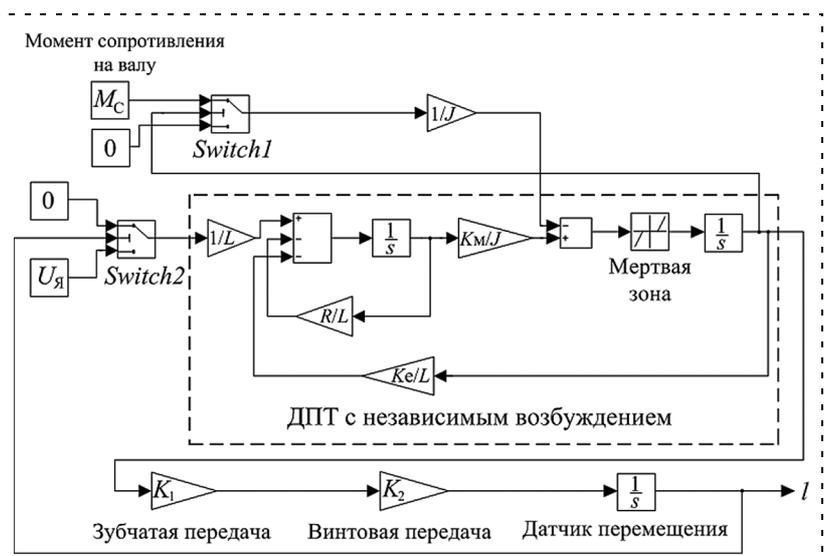


Рис. 3. Схема имитационной модели системы управления аппаратом при дистракционном остеосинтезе

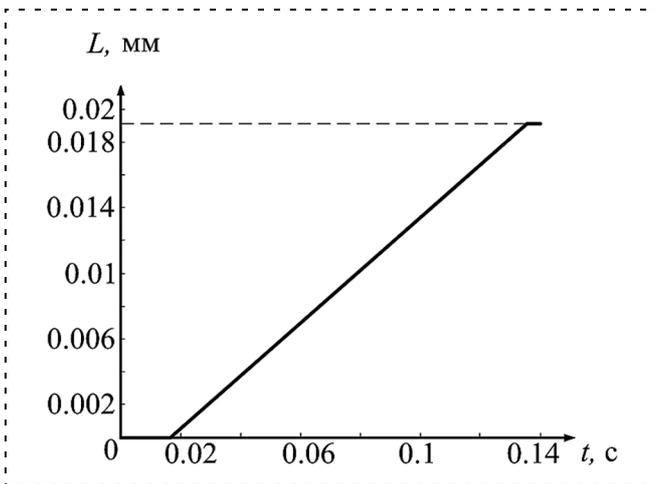


Рис. 4. Переходной процесс при distractionном остеосинтезе

ления зависит от вида перелома, его расположения в пространстве относительно мышц, связок и внутренних органов, от способа фиксации аппарата, особенностей опорно-двигательного аппарата больного, положения его тела и вида движения. Определить значение момента сопротивления довольно сложно. При моделировании считаем его равным 0,1 Н/м.

Так как момент сопротивления на валу реактивный, то в схему введен переключатель *Switch1*, который при угловой скорости, равной нулю, переключает значение момента M_c на нулевое.

Для обеспечения отключения питающего напряжения якоря U_a используется переключатель *Switch2*. Сигнал обратной связи по перемещению подается на переключатель, и при достижении уровня 0,017 мм происходит переключение U_a на нулевое значение.

В результате испытания модели при заданной требуемой репозиции, равной 0,017 мм, получен график переходного процесса (рис. 4). Установившееся значение достигается при выходном сигнале, равном 0,0186 мм, что входит в допустимые пределы $0,017 \pm 0,008$ мм согласно [3].

♦ **Имитационное моделирование системы при компрессионном остеосинтезе.** При данном способе управления необходимо постоянно поддерживать компрессию между фрагментами кости на заданном уровне. Основными причинами ее изменений являются: накапливание суммарных люфтов в местах соединений деталей конструкции аппарата с течением времени; изменение положения тела пациента и усилий его мышц и изменение вследствие этого напряженно-деформированного состояния в системе аппарат—кость. Поэтому с некоторой периодичностью необходимо проводить проверку значения силы сжатия костных фрагментов, а перед сменой положения тела больного или перед началом активных действий его опорно-двигательного аппарата нужно повышать компрессию на определенную величину, в зависимости от особенностей физиологии больного и от того, какие действия предполагается выполнять.

Структурная схема системы управления аппаратом подобна структурной схеме системы управления distractionным методом, но дополнительно содержит модель системы измерения механического напряжения в фиксирующих стержнях (рис. 5), описываемую формулами (1)—(3) и обозначенную на рис. 6 как "Блок 1". "Блок 2" (рис. 6) является упрощенной схемой "Блока 1" и представляет собой модель, описываемую формулой (3), на вход кото-

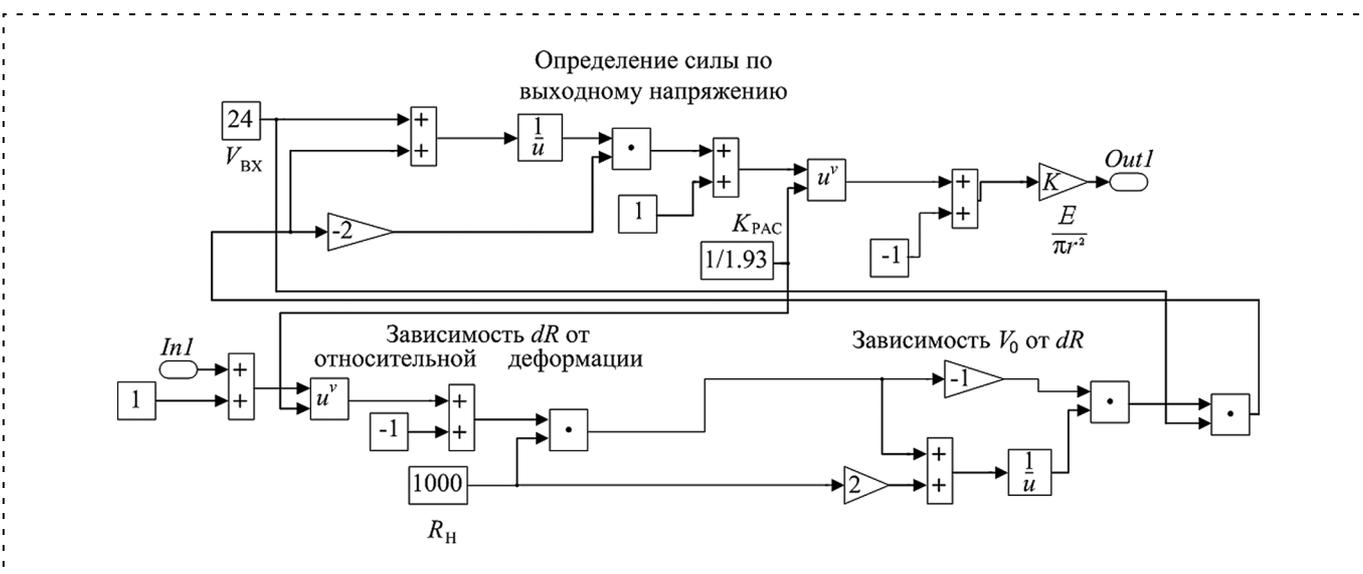


Рис. 5. Модель системы измерения механического напряжения

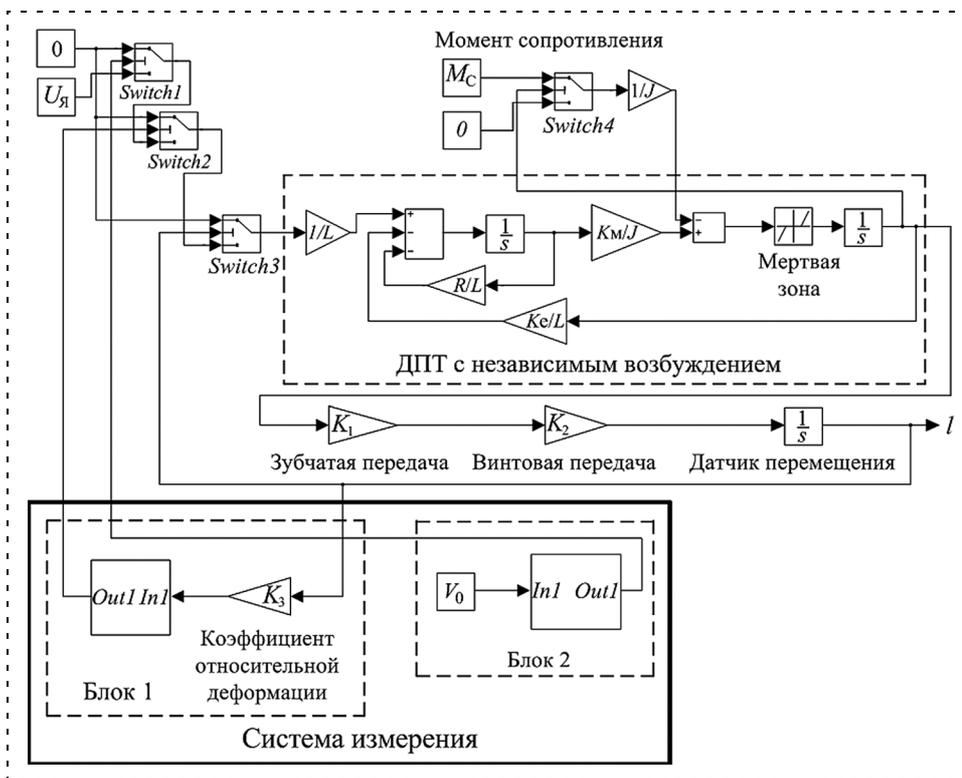


Рис. 6. Схема имитационной модели системы управления аппаратом при компрессионном остеосинтезе

рой подается выходное напряжение с измерительной мостовой схемы V_0 .

Имитационная модель системы управления аппаратом показана на рис. 6, она включает схему двигателя постоянного тока с независимым возбуждением — апериодическое звено второго порядка, цилиндрический зубчатый редуктор — безынерционное звено с коэффициентом усиления K_1 , винтовую передачу — безынерционное звено с коэффициентом усиления K_2 , датчик перемещения в виде интегрирующего звена. Также эта система содержит дополнительную обратную связь по механическому напряжению в стержнях. Механическое напряжение зависит от относительной деформации и коэффициента упругости K_3 системы аппарат—кость.

Коэффициент упругости системы аппарат—кость является нелинейной функцией, зависящей от геометрии перелома и от индивидуальных особенностей биомеханики опорно-двигательного аппарата больного, но для малых перемещений считаем, что этот коэффициент является линейной функцией.

Принцип работы системы управления аппаратом заключается в том, что через заданный промежуток времени происходит подключение измерительной системы и исполнительного механизма к системе управления. Затем идет проверка входных параметров на соответствие требуемым значениям. Если значение компрессии не удовлетворяет тре-

буемой (30 Н), то двигатель включается и приводит в действие компрессирующий узел. При достижении требуемого уровня компрессии либо предела допустимого значения репозиции 1 мм двигатель отключается.

В результате имитационного моделирования процесса компрессии при значениях выходного напряжения с измерительной мостовой схемы $V_0 = 0,02$ и $V_0 = 0,028$, соответствующих компрессии меньше 30 Н и больше 30 Н соответственно, получены графики переходных процессов, представленные на рис. 7, из которых можно сделать вывод о том, что при компрессии меньше 30 Н происходит включение двигателя и осуществляется репозиция для создания компрессии необходимой величины, при силе компрессии

больше 30 Н включение двигателя и репозиция не происходят.

Размеры и формы переломов и костей у разных людей отличаются, поэтому геометрические размеры системы аппарат—кость различны. Для учета этого был введен коэффициент относительной деформации K_3 (см. рис. 6), преобразующий абсолютное перемещение в относительную деформацию. Поэтому чем больше размеры системы, тем коэф-

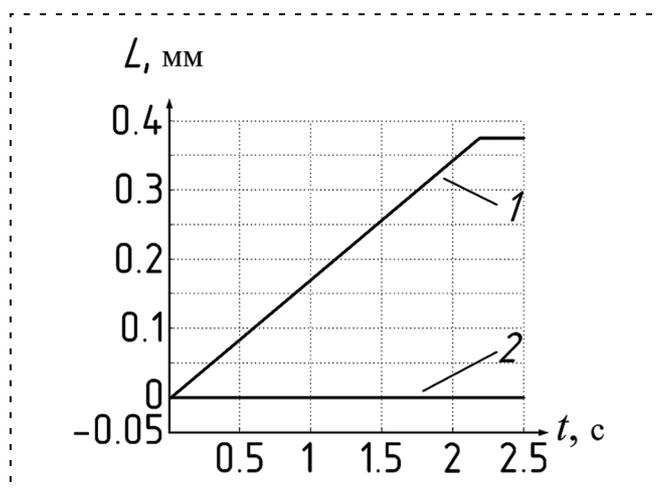


Рис. 7. Переходные процессы при компрессионном остеосинтезе с разными выходными напряжениями с измерительной мостовой схемы: 1 — при $V_0 = 0,02$; 2 — при $V_0 = 0,028$

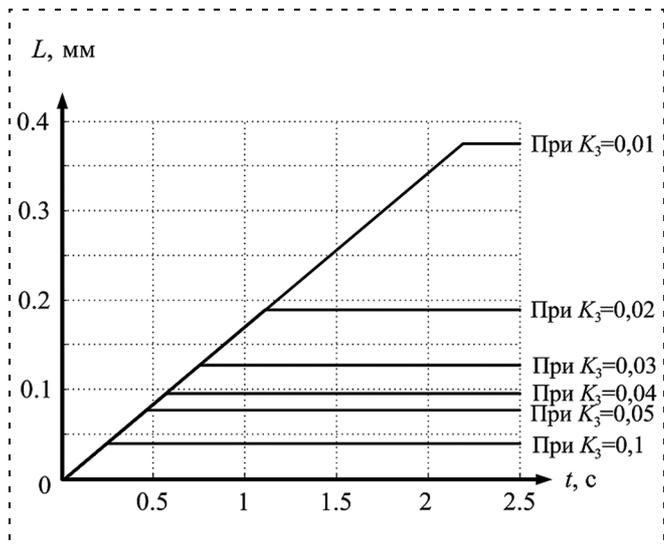


Рис. 8. Переходные процессы при компрессионном остеосинтезе с разными коэффициентами относительной деформации

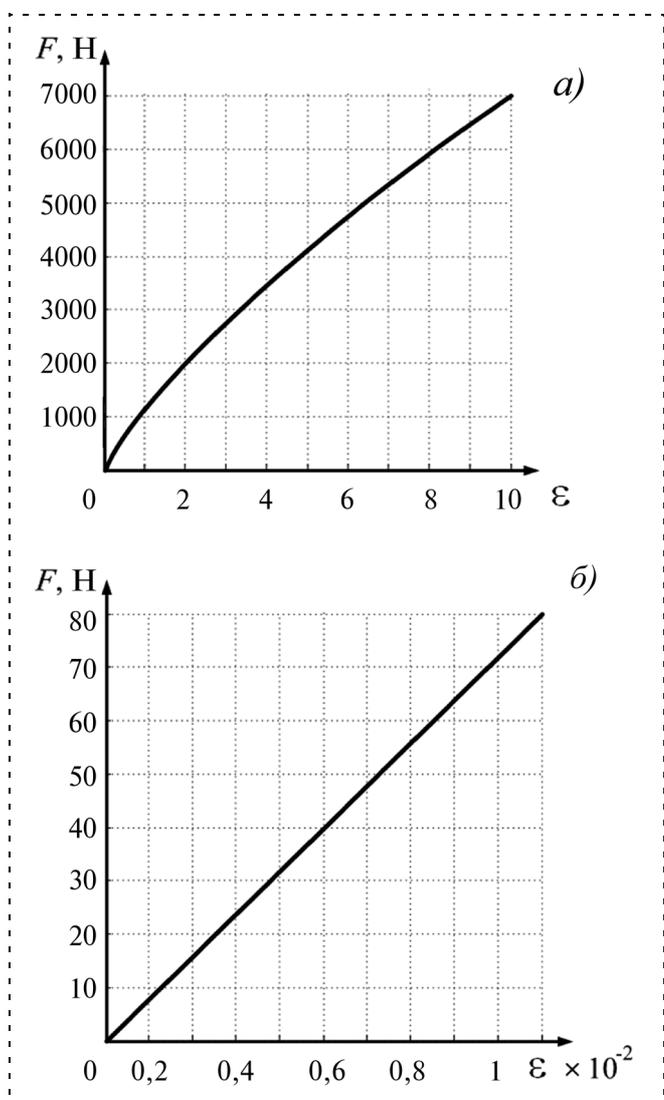


Рис. 9. Зависимость силы от относительной деформации, полученная с помощью модели системы измерения

фициент меньше. Графики переходных процессов при разных значениях коэффициента относительной деформации, полученные при имитационном моделировании, показаны на рис. 8.

Из графиков, представленных на рис. 8, можно сделать следующий вывод: при большем коэффициенте пропорциональности требуется проводить репозицию меньшей величины и за меньшее время.

Модель системы измерения силы при измерении больших деформаций носит нелинейный характер, что видно из рис. 9, а, но при малых значениях репозиции, а следовательно, при малых относительных деформациях система ведет себя линейно (рис. 9, б).

Заключение

Имитационное моделирование процесса компрессии и distraction отломков костей аппаратом остеосинтеза с применением системы управления показало, что при distractionном остеосинтезе репозиция соответствует требуемому значению, а при компрессионном остеосинтезе репозиция совершается, когда сила компрессии меньше требуемой. Значение репозиции при этом зависит от формы и размера перелома и от геометрических размеров системы аппарат—кость. Модель системы измерения является нелинейной, но при малых значениях репозиции она ведет себя линейно.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем автоматизированного управления аппаратами остеосинтеза.

Список литературы

1. Muller M. E., Algoter M., Schneider R., Willenger H. Руководство по внутреннему остеосинтезу. М.: Ad Marginem, 1996, 750 с.
2. Стецула В. И., Девятов А. А. Чрескостный остеосинтез в травматологии. К.: Здоров'я, 1987. 200 с.
3. Шевцов В. И., Немков В. А., Скляр Л. В. Аппарат Илизарова — Биомеханика. Курган: Периодика, 1995, 165 с.
4. Козырев В. В., Новожилов А. И., Федотов О. В., Паринов С. М. Шарнирно-стержневая конструкция автоматизированного аппарата остеосинтеза и ее исследование // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2008. № 3. С. 2—8.
5. Бушманов А. В., Серов М. А., Троцкий Д. В. Устройство для репозиции и фиксации переломов костей таза // Патент РФ № 2240746, опубл. 27.11.2004.
6. Бушманов А. В., Дрюков А. А. Анализ тензометрической системы для измерения механического напряжения в стержне фиксирующего аппарата для остеосинтеза // Вестник Амурского государственного университета. 2007. Вып. 39. С. 27—30.
7. Клокова Н. П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
8. Арменский Е. В., Фалк Г. Б. Электрические микромашины. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учеб. пособ. для электротехн. специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1975. 240 с.
9. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 392 с.

И. А. Матвеев, канд. физ.-мат. наук, зав. сектором интеллектуальных управляющих систем, Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, ivanmatveev@mail.ru

Алгоритм поиска радужки глаза по взаимосвязанным максимумам проекций градиентов яркости*

Предложен метод обнаружения на изображении радужки глаза при условии, что известны координаты некоторой точки, лежащей внутри зрачка. Метод основан на построении гистограмм — проекций локальных градиентов яркости и сопоставлении их максимумов как возможных положений границ зрачка и радужки. Метод отличается малой вычислительной сложностью и высокой устойчивостью к шумам.

Ключевые слова: идентификация по радужке глаза, обработка изображений, градиент яркости, метод проекций.

Распознавание человека по радужке глаза является одной из наиболее востребованных биометрических технологий. Важной частью систем регистрации изображения радужки является алгоритм определения ее размеров и положения на изображении. При этом актуальны следующие характеристики алгоритма:

- надежность (понимаемая здесь как способность метода находить радужку на изображениях, где она действительно присутствует, равно как отвергать изображения, на которых ее нет);
- точность (выдаваемые алгоритмом координаты должны мало отличаться от реальных);
- скорость работы (возможность обработки стандартного видеопотока 640*480*30 fps);
- устойчивость к шумам (в том числе паразитным бликам, затенению веками и ресницами);
- способность работать с изображениями, полученными различными сенсорами (в том числе находить радужки, различающиеся по видимым размерам в несколько раз).

Внешние границы и радужки и зрачка с хорошей точностью могут быть приближены окружностями, поэтому поиск окружности — центральный элемент любой системы образмеривания радужки на изображении. Существует большое число методов поиска окружности (круга), апробированных на данной задаче: определение центра масс объекта, выделенного пороговой функцией [1], определение наиболее удаленной от краев точки этого объ-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-08-13668-офи_ц)

екта [2], максимизация интегро-дифференциального оператора, обладающего круговой симметрией [3], обобщенное [4, 5] и разделенное [6] преобразование Хафа, преобразование Хафа, использующее градиент яркости [7, 8, 9], метод проекций градиента яркости [10]. Но ни один из этих методов не удовлетворяет всем перечисленным условиям.

Однако до сих пор не учитывался тот факт, что окружностей на изображении радужки имеются две (а именно, граница зрачок—радужка и граница радужка—склера), причем параметры этих окружностей взаимосвязаны. Одновременный поиск зрачка и радужки как окружностей, параметры которых удовлетворяют определенным взаимным ограничениям, накладываемым природой радужки, позволяет существенно улучшить характеристики алгоритма по сравнению с поиском одиночной окружности. Предлагается алгоритм поиска радужки глаза, основанный на построении гистограмм — круговых проекций локальных градиентов яркости и сопоставлении их максимумов как возможных положений границ зрачка и радужки.

Построение круговых проекций градиента яркости

Как и в большинстве задач распознавания, проблема сводится к выбору наилучшей из возможных альтернатив, в данном случае — наилучшего расположения пары окружностей зрачка и радужки. Для построения возможных положений зрачка и радужки выбран метод проекций (гистограмм), используются круговые проекции локальных градиентов яркости изображения, центрированные относительно заданной точки — приближенного положения центра глаза.

Входными данными алгоритма служат растровое монохромное изображение и координата центра предполагаемого глаза [9]. Диаметр радужки, которая может быть найдена, не превышает размеров изображения.

Обозначим: $\mathbf{c} = (c_x, c_y)^T$ — известный центр глаза, лежащий внутри круга, концентрического искомого и имеющего радиус не более половины радиуса искомого. Далее для простоты начало координат переносится в эту точку; $\mathbf{x} = (x, y)^T$ — вектор координаты точки на изображении; $b(\mathbf{x})$ — яркость изображения в заданной точке (интенсивность); $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_x, g_y)^T$ — градиент яркости: $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \nabla b(\mathbf{x})$. Для расчета градиента на оцифрованном дискретном изображении используется маска Собеля.

Множество точек, имеющих градиент яркости нужного направления и величины, описывается функцией-индикатором

$$v_U(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{при } |\mathbf{g}| > T_1; T_2 < \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{g}}{\|\mathbf{x}\| \|\mathbf{g}\|} < T_3; U; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где T_1, T_2, T_3 — пороги, устанавливаемые согласно характеристикам входных изображений; U — дополнительное условие, выделяющее сектор плоскости относительно начала координат (т. е. точки C). Используются следующие условия для выделения левого, правого, нижнего и верхнего квадрантов:

$$U = \begin{cases} L: |x| > |y|, x < 0; \\ R: |x| > |y|, x > 0; \\ B: |x| < |y|, x < 0; \\ T: |x| > |y|, x > 0. \end{cases}$$

Взяв для $v_U(\mathbf{x})$ одно из условий, например $U \equiv R$, можно получить гистограмму числа точек, удовлетворяющих условиям на градиент, как функцию от радиуса. Например, нормированная на радиус гистограмма (тангенциальная проекция) числа точек с градиентом нужного направления и величины в правой четверти окружности задается формулой

$$P_R(r) = \frac{1}{2\pi r} \sum_{r-0,5 < \|\mathbf{x}\| < r+0,5} v_R(\mathbf{x}).$$

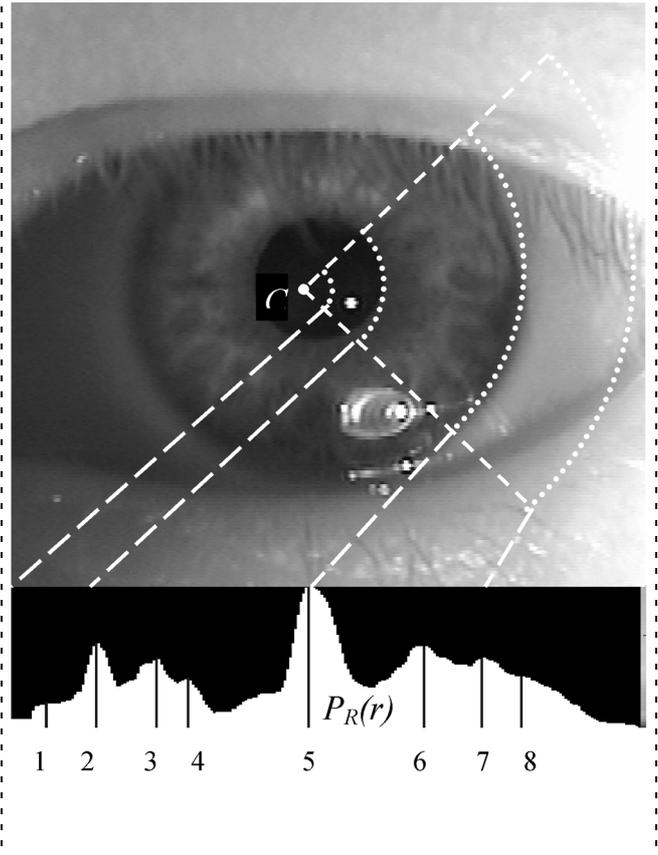
На рисунке представлено изображение глаза и полученная по нему локальная гистограмма в правом квадранте $P_R(r)$. На гистограмме выделены положения восьми локальных максимумов $\text{argloc max}_{n,r} P_R(r)$, $n = 1..8$. Определив положения локальных максимумов для всех четырех квадрантов, можно получить возможные удаления границ гипотетических окружностей от заданной точки в соответствующем направлении.

Комбинируя эти величины, можно получить координаты центров $\mathbf{p} = (p_x, p_y)^T$ и радиусы ρ этих окружностей:

$$p_x^{n,m} = \frac{1}{2} (\text{argloc max}_{n,r} P_R(r) - \text{argloc max}_{m,r} P_L(r));$$

$$p_y^{u,v} = \frac{1}{2} (\text{argloc max}_{u,r} P_T(r) - \text{argloc max}_{v,r} P_B(r));$$

$$\rho^{n,m,u,v} = \frac{1}{2} (\text{argloc max}_{n,r} P_R(r) + \text{argloc max}_{m,r} P_L(r) + \text{argloc max}_{u,r} P_T(r) + \text{argloc max}_{v,r} P_B(r)).$$



Пример круговой проекции и положений локальных максимумов

Качеством окружности, полученной для заданных положений локальных максимумов n, m, u, v назовем сумму функций проекций в этих положениях:

$$Q_{n,m,u,v} = \text{loc max}_{n,r} P_R(r) + \text{loc max}_{m,r} P_L(r) + \text{loc max}_{u,r} P_T(r) + \text{loc max}_{v,r} P_B(r).$$

Выбор взаимосвязанных максимумов гистограмм

Итак, методом круговых проекций строятся различные гипотетические окружности зрачка и радужки. Обозначим окружности через их параметры — координаты центра и радиус (x_p, y_p, r_p) и (x_I, y_I, r_I) . На эти параметры накладываются ограничения, обусловленные природой радужки человека:

- 1) $r_p > \frac{1}{6} r_I$ (радиус радужки не может превосходить радиус зрачка более чем в 6 раз);
- 2) $r_p < \frac{3}{4} r_I$ (зрачок не может занимать больше 75 % радужки);

Результаты работы алгоритма на различных тестовых базах изображений

База данных	Число изображений	Число умеренных ошибок определения зрачка	Число грубых ошибок определения зрачка	Число умеренных ошибок определения радужки	Число грубых ошибок определения радужки
UBIRIS	1207	315	3	32	1
CASIA	16 213	1916	31	212	20
ICE	2954	112	7	9	2

3) $d < r_p$, $d = \sqrt{(x_I - x_p)^2 + (y_I - y_p)^2}$ — расстояние между центрами зрачка и радужки (центр радужки лежит внутри зрачка);

$$4) 2(r_I - r_p - d) > r_I - r_p + d, \text{ или } d < \frac{r_I - r_p}{3}$$

(отрезки между окружностями зрачка и радужки, отсеченные прямой, проходящей через их центры, не отличаются по длине более чем в два раза).

Из всех пар окружностей, удовлетворяющих условиям 1)–4), выберем такую, сумма показателей качества компонент которой максимальна.

Таким образом, алгоритм в целом представляет собой процедуру из четырех шагов:

1. Вычисление локальных градиентов на изображении.
2. Построение круговых проекций (гистограмм) для четырех квадрантов.
3. Выделение значимых локальных максимумов на гистограммах.
4. Поиск наиболее правдоподобной (с наивысшим суммарным качеством) комбинации локальных максимумов.

Апробация алгоритма

Для проведения экспериментов использовались следующие общедоступные базы данных:

- UBIRIS (<http://www.di.ubi.pt/~hugomcp/doc/ubiris/pdf>), 1207 изображений;
- CASIA Iris Image Database (<http://www.sinobiometrics.com>), 16213 изображений;
- Iris Challenge Evaluation (<http://iris.nist.gov/ice/>), 2954 изображения.

Методика тестирования. Изображения глаз были просмотрены человеком-экспертом, который указал центры и радиусы зрачка и радужки на каждом из них. Эти данные далее считались истинными и использовались для верификации метода.

Методом [9] на каждом изображении была определена точка, принадлежащая зрачку. Затем предложенным методом были определены параметры зрачка и радужки, полученные значения сравнивали с указанными оператором. В таблице приведено число грубых ошибок (различия хотя бы в одной из шести величин превышают 10 пикселей) и умеренных ошибок (различия от 5 до 10 пикселей). При отличии параметров меньше 5 пикселей радужка считалась образмеренной правильно.

Скорость работы метода на процессоре P-IV 3GHz — около 0,01 с для изображения 640 * 480 точек. Основное время занимает вычисление градиентов оператором Собеля.

Предлагаемый метод поиска радужки может быть применен для предварительного определения координат окружности радужки (с точностью до 5 пикселей) и зрачка (с точностью до 10 пикселей) при том, что известна точка, лежащая внутри зрачка. Метод пригоден для работы в реальном времени.

Список литературы

1. **Маенраа Т.** An Iterative Algorithm for Fast Iris Detection // IWBRIS 2005. Beijing, China: Beijing Press. P. 127–134.
2. **Lipinski В.** Iris Recognition: Detecting the pupil // <http://cnx.org/content/m12487/latest/>.
3. **Daugman J.** High confidence personal identification by rapid video analysis of iris texture // Proc. IEEE Internat. Carnahan conf. on security technology, 1992. P. 50–60.
4. **Wildes R. P., Asmuth J. C., Green G. L.** et al. A system for automated iris recognition // Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. 1994. P. 121–128.
5. **Duda R. O., Hart P. E.** Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Comm. ACM. 1972. V. 15. P. 11–15.
6. **Benn D. E., Nixon M. S., Carter J. N.** Robust eye centre extraction using the Hough Transform // Proc. 1st Int. Conf on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, 1997.
7. **Kimme C., Ballard D., Sklansky J.** Finding circles by an array of accumulators // Comm. ACM. 1975. V. 18. P. 120–122.
8. **Davies E. R.** A high speed algorithm for circular object location // Pattern Recognition Letters. 1987. V. 6. P. 323–333.
9. **Матвеев И. А.** Поиск центра глаза на изображении методом Хафа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 2. С. 36–40.
10. **Матвеев И. А.** Метод поиска окружности с известной внутренней точкой на изображении // Тр. ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2007. № 31(1). С. 288–293.

В. В. Бураков, канд. техн. наук, доц.,
Санкт-Петербургский государственный
университет авиационного приборостроения,
VadimBurakov@yandex.ru

Модели и алгоритмы управления качеством программных средств на примере приложения для военной телемедицины

Описана технология, разработанная для придания процессам, связанным с работой над качеством программ, формального характера. Перечислены и кратко описаны формальные модели, на которых основана описываемая технология. Приведен алгоритм, с помощью которого с участием экспертов происходит автоматизация процессов управления качеством. Описан опыт использования моделей и алгоритма для управления качеством программной системы военной телемедицины.

Ключевые слова: качество программ, модель качества программы, обеспечение качества программы, управление качеством программы, программное обеспечение телемедицины.

Обобщая определения стандартов, можно заключить, что качество программного обеспечения — это способность программного продукта к удовлетворению установленных или предполагаемых потребностей при использовании в заданных условиях. Актуальные стандарты [1], а также признанные спе-

циалисты инженерии программ [2] определяют показатели качества и процессы обеспечения качества в основном в обобщенном, непригодном для непосредственного применения виде. Отсутствуют модели качества ПС, задающие однозначное толкование характеристик и показателей, однозначную интерпретацию измерений, связи моделей качества и архитектурных решений. Отсутствуют строгие процедуры оценки и улучшения качества ПС. В этих условиях предприятиям-разработчикам программ трудно гарантировать достижение требуемого уровня качества своих разработок. Предлагаемая статья посвящена обобщенному описанию технологии, которая реализует постоянный мониторинг и управление свойствами ПС в целях гарантированного достижения заданных показателей качества. Более подробно модели, на которых основана описываемая технология, приведены в работах [3–5].

Модели управления качеством программных средств

В обобщенном виде компоненты системы управления качеством и их взаимодействие представлены на рис. 1.

Согласно принципам описываемой технологии, исходный код является основой ПС, и именно путем анализа исходного кода, выявления его дефектов и генерации нового кода обеспечивается улучшение качества ПС.

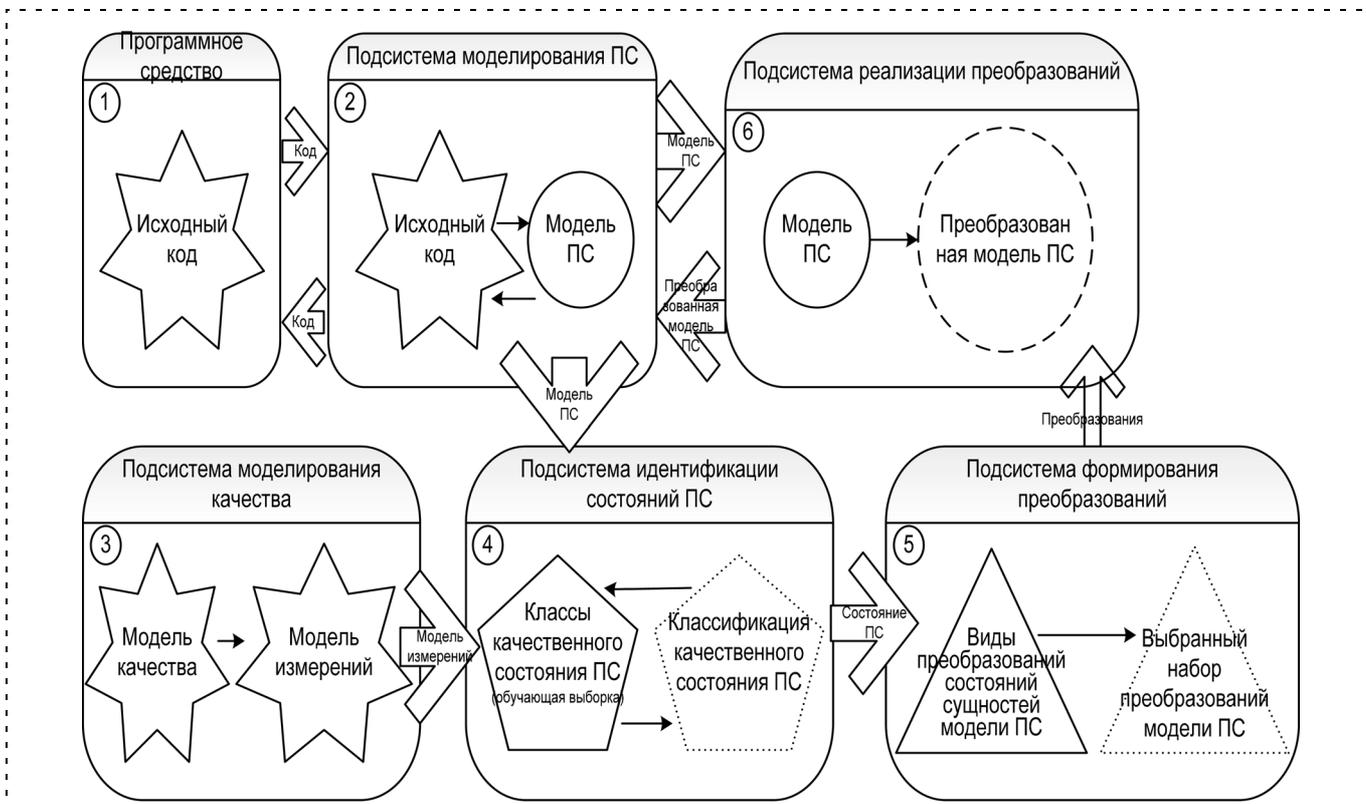


Рис. 1. Общая структура системы управления качеством ПС

Исходный код поступает на вход подсистемы моделирования ПС, в которой происходит генерация *модели ПС*. В этой модели для представления кода ПС используется теория графов в силу наглядности и простоты описательных механизмов и широких возможностей по изменению уровня детализации моделей в соответствии с задачами описания [3]. Базовые понятия теории графов расширяются для моделирования ПС с помощью введения меток для идентификации вершин и ребер и ролей для задания прецедентов использования сущностей ПС. Для соотношения вершин и ребер графа с моделируемыми сущностями ПС вводится специальный тип метаграфов — типовые графы. Стадию моделирования предваряет стадия адаптации, которая заключается в типизации вершин и ребер графа и построении множества типовых графов для описания определенной предметной области.

Подсистема моделирования качества предназначена для создания *модели качества* и *модели измерений ПС*. Для моделирования качества используется теория категорий, объектами которой являются характеристики, подхарактеристики ПС и архитектурные решения [3], морфизмами — строгие и нестрогие иерархические морфизмы для определения связей между разноуровневыми элементами модели и одноуровневые морфизмы для моделирования взаимовлияний элементов одного уровня иерархии. Категория не задает конкретную интерпретацию объектов качества, а предоставляет инструменты для определения и последующего использования любых понятий, имеющих отношение к качеству ПС. Категория содержит все возможные объекты качества со всеми возможными связями между ними. Для создания модели качества, соответствующей определенному стандарту или проекту, определяется подкатегория, в которую выбираются нужные подмножества объектов и морфизмов.

Модель измерений предназначена для формализации сущностей, участвующих в определении понятий, которые используются в модели качества [4]. Ключевыми объектами измерений в модели служат метрики. Метрики качества ПС бывают двух видов — *базовые*, не зависящие ни от каких других метрик, и *производные*, являющиеся выражением функциональной зависимости от других базовых и производных метрик. Вместе с графовыми моделями, представляющими множество моделей ПС, которые обладают одинаковой функциональностью, но различаются структурой, базовые и производные метрики образуют множество метрических пространств. Для отражения зависимости одних производных метрик от других производных или базовых метрик на метрических пространствах, сформированных моделями ПС и метриками качества ПС, вводится

множество операторов комплексирования. Категория измерений ПС представляется в виде малой категории, объектами которой являются метрические пространства, образованные моделями ПС и метриками качества ПС, а морфизмами — операторы комплексирования. Для отображения объектов категории качества (характеристик, подхарактеристик, архитектурных решений) на метрические пространства категории измерений (базовые и производные) вводится контравариантный одноместный функтор. Задачей такого отображения является генерация модели измерений, соответствующей по своей структуре модели качества и представляющей основу для ее количественной оценки.

Задачи подсистемы идентификации состояний ПС включают в себя оценивание значений метрик на основе модели измерений и модели ПС и определение состояния ПС и его компонентов на основе значений метрик с использованием методов классификации и теории принятия решений.

При решении задач подсистемы формирования преобразований используются методы классификации и теории принятия решений для определения оптимального набора преобразований на основе состояния ПС. Идентификация состояния ПС представляет собой процесс принятия решения о его принадлежности к определенной классификационной категории. Формирование преобразований заключается в принятии решения, состоящего в выборе набора преобразований ПС, оптимального по определенному критерию.

В задачи подсистемы реализации преобразований входит выполнение преобразований графовой модели ПС [5]. Здесь на базовых метрических пространствах на основе модели измерений вводятся базовые операторы преобразований, которые изменяют значения базовых метрик путем преобразования графовой модели ПС. В множество таких операторов входят операторы добавления и удаления вершины (ребра) для всех типов вершин и ребер. На производных метрических пространствах вводятся производные операторы преобразований, с помощью которых изменяются значения производных метрик.

Обобщенный экспериментальный алгоритм управления качеством программных средств

В целях формализации процесса управления качеством был разработан алгоритм, который регламентирует использование моделей ПС, моделей качества, измерений и преобразований ПС. Алгоритм предназначен для автоматизации процесса управления, некоторые действия этого алгоритма предполагают привлечение экспертов в области разработки ПС. На рис. 2 в нотации диаграммы действий

UML представлена схема этого алгоритма. Рассмотрим шаги алгоритма управления качеством ПС более подробно.

Шаг 1. Определение общих требований к качеству ПС: построение модели качества, модели измерений (подсистема 3 на рис. 1).

На шаге 1 происходит детализация понятия качества ПС. Выбираются характеристики качества, определяются архитектурные решения. Строится модель качества, включающая характеристики и архитектурные решения как объекты. С помощью морфизмов модели качества учитываются иерархические и одноуровневые отношения между характеристиками и архитектурными решениями. С помощью контравариантного функтора из модели качества формируется модель измерений, в которой каждой характеристике, подхарактеристике, архитектурному решению модели качества соответствует

производная метрика. При этом каждому концептуальному показателю качества с помощью функтора ставится в соответствие метрическое пространство, на котором этот показатель может быть количественно оценен. Все эти работы реализуются обобщенно, без учета конкретной специфики проекта. Формируемые требования по своей природе являются противоречивыми, здесь на основе работы экспертов находится компромисс, учитывающий взаимовлияния показателей качества.

Шаг 2. Определение требований к качеству с учетом языка разработки: детализация модели метрик (подбор базовых и определение функциональных зависимостей между метриками) (подсистема 3 на рис. 1).

На основе анализа конструкций языка программирования или моделирования экспертами определяются базовые метрики, подходящие для оценки

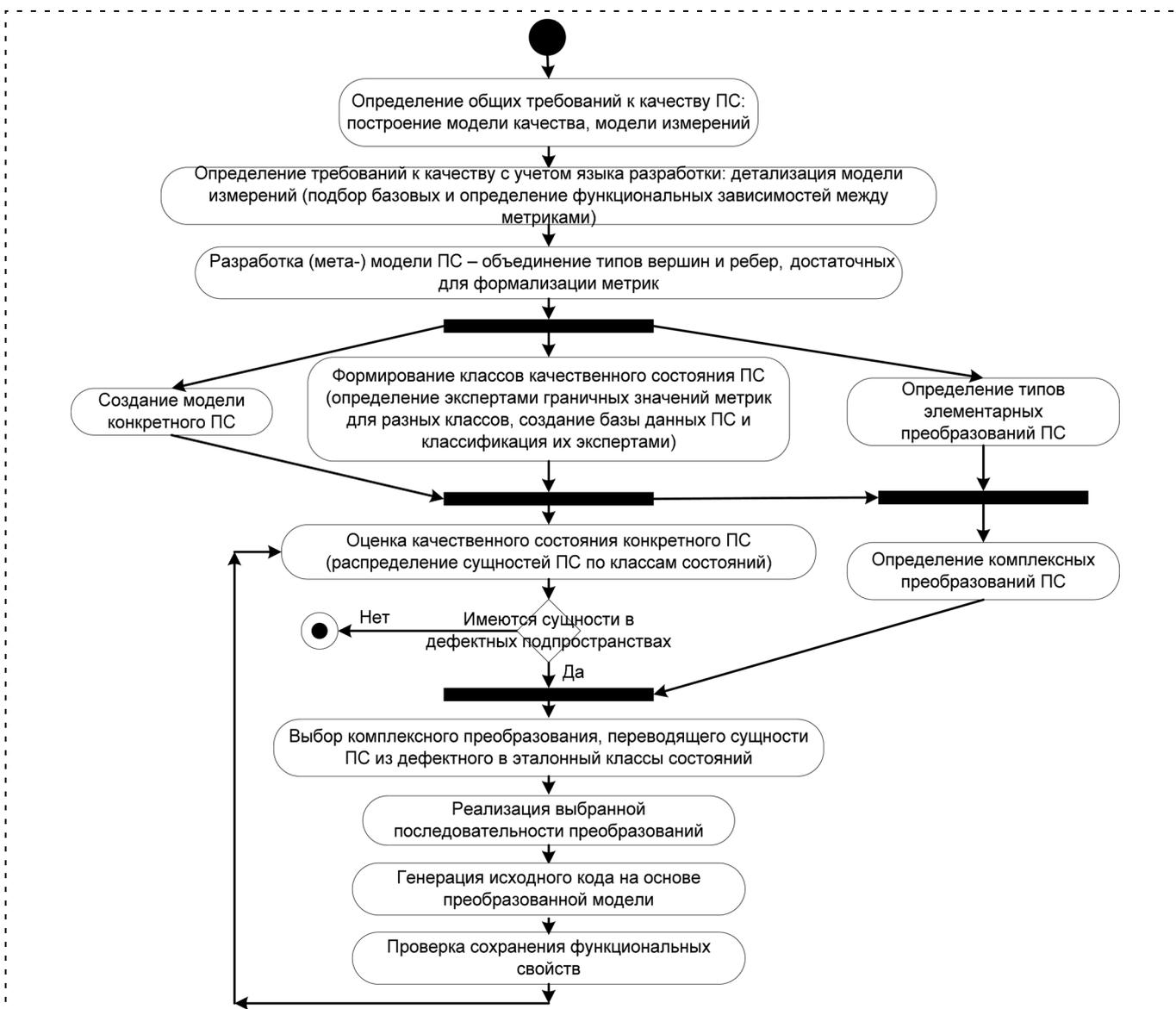


Рис. 2. Алгоритм управления качеством ПС

производных метрик. Объекты модели измерений дополняются этими базовыми метриками. Экспертами детализируются морфизмы модели измерений для задания функциональных зависимостей между объектами модели измерений.

Шаг 3. Разработка (мета-)модели ПС — объединение типов вершин и ребер, достаточных для описания метрик (подсистема 2 на рис. 1).

На основе анализа модели качества выбираются значимые сущности и отношения ПС, которые становятся типами вершин и ребер. Решение о составе множества языковых конструкций, подлежащих моделированию, принимается на основе модели измерений при определении набора базовых метрик для оценки производных.

Шаг 4. Определение типов элементарных преобразований ПС (подсистема 5 на рис. 1).

Формируется перечень элементарных преобразований, базис которых представляет собой удаление или добавление вершины или ребра каждого типа. Дополнительно могут определяться такие операции, как переименование, изменение типа и другие преобразования ПС.

Шаг 5. Формирование классов качественного состояния ПС (определение экспертами граничных значений метрик для разных классов, создание базы данных ПС и классификация их экспертами или системой на основе репозитория ПС) (подсистема 4 на рис. 1).

Информация о модели измерений, ПС и элементарных преобразованиях поступает на вход подсистемы обучения с учителем. Экспертами системе сообщаются диапазоны значений метрик для всех типов программных сущностей. Выбираются шкалы оценки состояний (например, "эталонное", "дефектное"). На вход системы также могут быть поданы ПС, состояние качества которых заранее известно, таким образом формируется репозиторий ПС. В системе происходит анализ значений метрик программных сущностей этих ПС. Эксперты анализируют и корректируют результаты автоматизированного анализа ПС. Таким образом формируется обучающая выборка, на основе которой задаются решающие правила (классы состояний ПС, отражающие весь спектр будущих возможных состояний), а также определяется ценность метрик для возможного снижения размерности метрического пространства.

Шаг 6. Определение комплексных преобразований ПС (подсистема 5 на рис. 1).

На основе метамодели на шаге 4 формируются элементарные преобразования [5]. На данном шаге эти элементарные преобразования комбинируются в комплексные. Каждое комплексное преобразование соответствует приведению сущности ПС из одного класса состояния в другое.

Шаг 7. Создание модели конкретного ПС (подсистемы 1 и 2 на рис. 1).

На основании определенных типов вершин и ребер строится модель ПС, качество которой подлежит оценке.

Шаг 8. Оценка качественного состояния конкретного ПС (распределение сущностей ПС по классам состояний) (подсистема 4 на рис. 1).

Осуществляется применение решающих правил, выработанных на шаге 5.

В подсистеме идентификации предусмотрен режим дозаписи классифицируемой выборки к обучающей, чтобы в последующем, когда станет известна степень адекватности прогноза результатов преобразований ПС, этой верифицированной оценочной информацией дополнить обучающую выборку и переформировать решающие правила. Таким образом реализуется обучающая обратная связь.

Шаг 9. Выбор комплексного преобразования, переводящего сущности ПС из дефектного в эталонный классы состояний (подсистема 5 на рис. 1).

Из сформированных на шаге 6 типов преобразований выбирается комплексное преобразование или их композиция, которая сможет перевести сущности ПС, находящиеся в классе состояний, оцененном как дефектный, в класс эталонного состояния. Комплексное преобразование ищется на основе операторов того метрического пространства, метрика которого не соответствует эталонной. Это комплексное преобразование проходит процедуру оптимизации, состоящую в выборе за счет операторов комплексирования и процедуры нормализации минимально трудоемкой композиции элементарных преобразований.

Шаг 10. Реализация выбранной последовательности преобразований (подсистема 6 на рис. 1).

На данном шаге происходит реализация выбранного на шаге 9 комплексного преобразования или их композиции.

Шаг 11. Генерация исходного кода на основе преобразованной модели (подсистема 2 на рис. 1).

Происходит генерация исходного кода на целевом языке системы.

Шаг 12. Проверка сохранения функциональных свойств.

Осуществляется путем компиляции исходного кода, сгенерированного на шаге 11, получения исполняемых модулей ПС и запуска пакета функциональных тестов, состав которого позволяет сделать вывод о том, что осуществленные преобразования не повлияли на функциональные свойства ПС.

Шаг 13. Повтор шагов 7—11 до тех пор, пока качественное состояние ПС не будет соответствовать эталонному.

Шаг 14. Верификация решающих правил.

Если решающие правила построены и оптимизированы, но качество их работы неизвестно, то пользоваться ими для принятия решений было бы опрометчиво. Верификация решающих правил основана на использовании внутреннего критерия качества алгоритма классификации и может быть выполнена в любой момент, например по требованию экспертов, в обязательном порядке — после каждой адаптации к изменению модели качества. Для выполнения данной функции обучающая выборка копируется в классифицируемую, осуществляется ее автоматическая классификация, ее результаты сравниваются с независимой экспертной классификацией, на основе чего рассчитываются показатели качества решающих правил.

Апробация модельных и алгоритмических решений управления качеством при разработке программных средств для телемедицины

В качестве объекта исследования эффекта от применения описанной технологии использовалось специальное программное обеспечение военной телемедицины [6]. Новизна подхода реализации телемедицинских технологий в рамках данной работы заключалась в том, что в основу проекта были положены формализованные описания всех блоков информации, обрабатываемой в системе. Это потребовало большой работы военных медиков — представителей объектов автоматизации, были специфицированы виды и структура всех логических блоков данных системы (электронная история болезни, заявка на телемедицинскую консультацию, диагностические протоколы и т. п.). Эта работа велась параллельно с созданием формальных описаний всех процессов (последовательности действий при подготовке телемедицинской консультации, порядка взаимодействия консультанта и консультируемого и т. п.), лежащих в основе телемедицинских консультаций. Совместно с Военно-медицинской академией была разработана система классификаторов и статистических отчетов. В результате и данные, и механизмы работы с ними были четко специфицированы военными медиками — будущими пользователями системы. Особенностью реализации и применения телемедицинских технологий в военной медицине являются повышенные по сравнению с системами гражданского здравоохранения требования к уровню управляемости системы. По своей структуре телемедицинская сеть представляет собой звезду с ярко выраженным центром — телемедицинским диспетчерским пунктом. Для обеспечения информационной безопасности режимных объектов использованы выделенные каналы связи и специальное оборудование для шифрования связи.

Программное обеспечение военной телемедицины содержит порядка 170 000 строк кода, порядка 500 классов на языке C++. Основными особенностями реализации программы явились повышенные требования к надежности и безопасности, которые обуславливались спецификой предметной области. Для обеспечения контроля за этими показателями использовалась программная система управления качеством, обеспечивающая программную реализацию моделей и алгоритма, описанных выше. Была разработана модель качества, в которой с помощью экспертов были обозначены показатели и метрики качества, значения которых подлежали контролю для достижения требуемых свойств повышенной безопасности и надежности. Код ПС по мере разработки проходил стадию моделирования. Затем с помощью программной системы анализировали значения метрик модели кода, и эксперты получали информацию о необходимых структурных преобразованиях кода для достижения требуемых значений показателей.

При анализе результатов использования программной системы управления качеством коллективом экспертов было отмечено общее повышение качества СПО военной телемедицины за счет автоматизации: мониторинга значений важных с точки зрения экспертов метрик, поиска дефектов, подбора и выполнения преобразований программы.

В результате годового опыта работы 25 объектов системы военной телемедицины можно констатировать повышение качества лечебно-диагностических процессов госпиталей, санаториев и поликлиник за счет оперативного обмена опытом медицинских специалистов. Этот эффект достигается в том числе и с помощью высоких показателей надежности и безопасности работы программного обеспечения системы, которых удалось добиться благодаря использованию описанных моделей и алгоритма управления качеством.

Список литературы

1. ISO/IEC, ISO/IEC 25000: Software Engineering — Software Product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.
2. **Липаев В. В.** Выбор и оценивание характеристик качества программных средств. М.: Синтег, 2001. 228 с.
3. **Бураков В. В.** Концептуальное моделирование качества программных средств // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 7. С. 54—60.
4. **Бураков В. В.** Методика оценки качества программных средств // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 1. С. 35—41.
5. **Бураков В. В.** Формальный базис преобразований программных средств // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 2. С. 22—30.
6. **Бураков В. В., Устюхин Н. В., Ковригин Д. А.** Применение телемедицинских технологий в медицинской службе Вооруженных сил Российской Федерации // Медицина и высокие технологии. 2006. № 1. С. 73—79.

УДК 681.51:519.95

А. И. Кобрин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Московский энергетический институт
(технический университет),

Ю. Г. Мартыненко, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Институт механики Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова,

Е. В. Письменная, канд. техн. наук, доц.,
Московский государственный университет
приборостроения и автоматики,
Epismen@yandex.ru

Всероссийский научно-технический фестиваль молодежи "Мобильные роботы" имени проф. Е. А. Девянина

Обсуждается опыт внедрения новой инновационной технологии университетского образования, связанной с проведением Всероссийского научно-технического фестиваля молодежи "Мобильные роботы" имени проф. Е. А. Девянина и обеспечивающей подготовку высококвалифицированных кадров с глубокими практическими навыками в области мехатроники и робототехники.

Ключевые слова: мобильные роботы, образовательная технология, интеллектуальное управление.

В последние годы подготовка высококвалифицированных инженерных кадров, как и привлечение молодежи к научным исследованиям, входят в число приоритетных задач государственного уровня. Внимание к данному вопросу не случайно. Статистические данные свидетельствуют о постоянной тенденции старения научных кадров, острой нехватке квалифицированных инженеров, способных решать современные задачи. Обвальное падение финансирования науки и образования, которое произошло сразу после распада СССР, привело к тому, что в этот период уехали за рубеж или сменили сферу деятельности многие молодые талантливые люди. Одной из мер по предотвращению оттока научной молодежи за рубеж явилась Президентская целевая программа "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997—2000 гг." ("Интеграция"). По инициативе работавших в МЭИ (ТУ) профессоров А. И. Кобрин и Ю. Г. Мартыненко три организации — МГУ им. М. В. Ломоносова, МЭИ (ТУ) и ИПМ им. М. В. Келдыша РАН — подали заявку на проведение Всероссийских молодежных робототехнических соревнований. Фестиваль "Мобильные роботы" был задуман с тем, чтобы для решения практических задач управления и навигации в процессе робототехнических соревнований были применены самые последние достижения

фундаментальных наук, а исполнителями были бы молодые люди.

Заявка была поддержана конкурсным центром программы "Интеграция", и с января 1998 г. работа по организации соревнований начала выполняться. Был создан оргкомитет Фестиваля, ключевыми фигурами которого стали сотрудники Института механики МГУ Е. А. Девянин и А. В. Ленский.

Девянин Евгений Андреевич (1931—2002) — крупный ученый в области механики, управления, робототехники, Лауреат Государственной премии СССР.

Ленский Анатолий Викторович (1940—2008) — выдающийся конструктор робототехнических систем, лауреат премии А. А. Андропова РАН и Ломоносовской премии МГУ.

Руководителем проекта стал заведующий кафедрой теоретической механики МГУ, зав. отделом ИПМ им. М. В. Келдыша РАН академик Д. Е. Охоцимский.

Охоцимский Дмитрий Евгеньевич (1921—2005) — российский ученый, академик РАН (1991), Герой Социалистического Труда (1961), Лауреат Ленинской премии (1957), Государственной премии СССР (1970).

Чуть позже к организаторам присоединился МГТУ им. Н. В. Баумана.

Регламент соревнований рождался в ходе достаточно острых дискуссий. Профессор Е. А. Девянин предложил построить активный полигон. В качестве основы регламента он предложил гонку мобильных роботов по активным маякам. Это было новым и очень интересным предложением: существующий к тому времени французский регламент был основан на движении робота по полосе с разрывами, над которыми были подвешены пассивные отражатели — катафоты. Предложение Е. А. Девянина было принято, поскольку позволяло (в отличие от работы с катафотами) располагать маяки так далеко друг от друга, как желают организаторы соревнований. Будущее показало исключительную важность создания активного полигона, открывшего широкие возможности для моделирования заранее неизвестной для робота изменяющейся внешней среды и постановки перед роботом имеющих практическую направленность разнообразных задач, сложность которых могла варьироваться в значительных пределах. При этом основное внимание на соревнованиях было сконцентрировано на задачах, требующих создания интеллектуального робота.

При принятии решения о стандартной ходовой части (шасси, двигателя, энергообеспечение) мнения организаторов соревнований разделились. Часть членов оргкомитета активно отстаивала идею создания ходовой части на базе небольшого "вездехода" типа детской радиоуправляемой игрушки. Тем не менее, после достаточно острых дискуссий победило предложение, в котором в качестве ходовой части моно-типа использовался стандарт, принятый на международных соревнованиях мобильных роботов, уже не-

сколько лет проводимых во Франции Морисом Юганом. Выбор такого монотипа позволял командам воспользоваться изготовленными ранее в России по образцу и подобию французского аппарата элементами монотипа. Таким образом, было существенно сокращено время разработки мобильных роботов и облегчались международные контакты участников российских соревнований. Кроме того, было решено ввести в соревнования роботы "свободного класса", которые в добавление к "маячной программе" монотипа могли бы двигаться по заданной полосе, что еще больше сблизило программы российского и международного фестивалей.

Первый научно-технический фестиваль молодежи "Мобильные роботы" состоялся в МГУ в декабре 1998 г. С этого времени Президиум фестиваля возглавляет ректор МГУ академик Виктор Антонович Садовничий, помощь которого в организации Фестивалей трудно переоценить.

Фестиваль представляет собой многоплановое мероприятие, включающее научную школу-конференцию, соревнования мобильных роботов, показательные выступления роботов и демонстрацию новейших робототехнических систем, а также турнир по компьютерному (виртуальному) футболу, участники которого разрабатывают алгоритмы группового управления роботами-футболистами [1].

Фестиваль "Мобильные роботы" проходит при поддержке Научного совета РАН по робототехнике и автоматическому производству, Научно-методического совета по теоретической механике Министерства образования и науки РФ, Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике, Российского национального комитета по автоматике и управлению. Помощь в издании трудов Фестиваля оказывают программа "Университеты России" и Российский фонд фундаментальных исследований.

Большую помощь оказал университетский междисциплинарный научный проект "Интеллектуальные мехатронные системы", в рамках которого к организации и проведению фестиваля присоединился факультет ВМиК МГУ.

В соревнованиях Фестиваля помимо российских принимали участие команды из Франции, Кореи и Мексики, поэтому он фактически стал международным.

В течение ряда лет спонсорами Фестиваля являлись: фирма "Сауно", молодежная инновационная компания "Мовиком", научное общество "Молодежное", ООО "Инсайт полиграфикс". В 2008 г. Фестиваль получил поддержку Восточного административного округа Москвы и Института проблем управления РАН.

В память об одном из своих первых организаторов и идейном вдохновителе в 2003 г. Фестиваль получил имя профессора МГУ Евгения Андреевича Девянина.

Соревнования мобильных автономных роботов проводятся на ограниченной ровной горизонтальной площадке, которая представляет собой плоский горизонтальный прямоугольник размером 9×6 м, разбитый на квадратные клетки со стороной 1,5 м, которые окрашены так, что образуется "шахматная доска". На полигоне нанесена полоса — трасса шириной 50 мм, светлая на темных и темная на светлых квадратах,

состоящая из отрезков прямых и дуг окружностей радиуса 750 мм, стыкуемых на границах квадратов.

Полигон снабжен маяками, подвешенными над его поверхностью на высоте одного метра и имеющими ИК-излучатели с круговой диаграммой направленности. Если излучатель включен, то маяк является активным. В состав полигона входят также кабельная сеть и компьютерный пульт управления, обеспечивающие порядок и режим включения и выключения маяков в соответствии с задачей, поставленной перед роботом. Маяк оборудован датчиком, таким, что проезд под маяком робота с установленным на нем специальным диском фиксируется. Робот представляет собой автономную тележку, несущую необходимые датчики и систему управления движением. Роботы стартуют с определенной позиции, выполняют предписанную последовательность действий и заканчивают маршрут на "финише". Засекается затраченное на маршрут время; за ошибки при выполнении задачи добавляется штрафное время.

Система управления полигоном построена на базе персонального компьютера и имеет в своем составе аппаратуру, позволяющую вводить в компьютер показания всех датчиков маяков, а также включать и выключать маяки. Компьютерная программа позволяет реализовать различные задачи с автоматической регистрацией времени и фиксацией ошибок. Интерфейс с оператором обеспечивает гибкое управление — от ручного включения маяков с помощью "мыши" до автоматического с фиксацией результата. Конструкция полигона предусматривает задание нового маршрута с помощью оперативного изменения порядка включения маяков с пульта управления, а также с помощью перемещения маяков в перерывах между соревнованиями.

Главное условие соревнований — полная автономность в действиях робота, который во время движения может опираться только на свои локаторы и видеокамеры — "глаза" и бортовой компьютер — "мозг". Всякие попытки создателей робота в оказании внешней помощи своему "питомцу" сурово пресекаются судьями вплоть до дисквалификации провинившейся команды. Было даже запрещено участникам соревнований работать с компьютером робота между первой и второй попытками в каждом упражнении, чтобы нельзя было ввести координаты маяков и другие параметры полигона, которые стали известными после первой попытки.

При проведении Фестивалей мобильных роботов заранее вырабатывается новый регламент, при этом соблюдается преемственность относительно предыдущего. В частности, для роботов предлагались следующие задачи:

"Маяки". Робот движется к активному маяку. При проезде робота под маяком этот маяк автоматически выключается и включается следующий. При достижении последнего маяка автоматически фиксируется время.

"Ворота". В последовательность маяков включены ворота, прохождение через которые фиксируется автоматически системой "фотофиниш". Физическое касание маяков ворот штрафует прибавкой 10 с к реальному времени заезда.

"*Восьмерка*". Осуществляется попеременный обезд маяков, образующих ворота. Автоматически (или судьей) считается число пересечений роботом линии, соединяющей маяки. Когда это число становится равным заданному, ворота выключаются и включается финишный маяк.

"*Змейка*". Исходно включаются четыре маяка, формирующие "слаломную" траекторию, ее начало задается крайней парой (левой) активных маяков. При пересечении последних ворот змейки все образующие ее маяки выключаются и включается финишный маяк.

"*Куча*". Включаются одновременно несколько маяков. Стартовая позиция робота показана прямоугольником. Маяк выключается при проезде под ним робота. Задача робота — погасить все маяки в любом порядке. При прохождении последнего маяка фиксируется время.

"*Полоса*". Включается маяк. При проезде под ним робота маяк выключается, но никакой другой не включается. Отсутствие активных маяков означает, что робот должен переключиться на движение по полосе и двигаться по ней до включения какого-либо маяка. Когда включается финишный маяк, робот движется к нему, покинув полосу.

"*Проезд перекрестка*". Робот проезжает перекресток на разрешающий (зеленый) сигнал светофора в указанную сторону и продолжает движение по полосе до тех пор, пока не задается новый элемент упражнения.

Приведенный список заданий определяет следующий набор исходных задач, которые должен уметь решать робот:

1. Определять свое местоположение относительно маяков и полосы-трассы.
2. Планировать траекторию движения.
3. Осуществлять движение по спланированной траектории.
4. Выполнять распознавание светофора.

Всем задачам регламента можно поставить в соответствие задачи, имеющие как промышленное применение, так и обобщающие известные классические задачи. Именно по этой причине указанные соревнования могут рассматриваться как основа для выработки универсальных подходов к созданию автономных мобильных роботов. Решение задач фестиваля стимулировало постановки и решение новых задач механики и управления [4, 5].

Отличием фестиваля 2005 г. от всех предыдущих была его двухэтапность. Первая часть Фестиваля прошла с 21 по 25 марта в Институте механики МГУ, а второй, заключительный, этап — с 23 по 28 мая под Парижем в Университете Версаль-Сан-Кантен в Ивелинах. В соответствии с приказом ректора МГУ В. А. Садовниченко этот фестиваль включен в список общеуниверситетских мероприятий, посвященных 250-летию юбилею Московского университета. Это единственный российский научно-технический молодежный фестиваль, регулярно проходящий за рубежом.

Несмотря на "чужие стены", российские роботы полностью доминировали в соревнованиях, оставив за собой и корейский, и французские роботы.

Хотя французский оргкомитет и усложнил программу соревнований (он впервые включил в число обязательных новые упражнения, требующие достаточно высокого уровня "интеллекта" робота — обезд подвижного препятствия и поиск погашенного маяка), все три первых места в упорнейшей борьбе завоевали российские команды. На первом месте оказался робот механико-математического факультета МГУ "Аргонавт-3" (руководитель проф. В. Е. Павловский), второе место занял робот "Кронус" из Института механики МГУ (руководитель в. н. с. В. М. Буданов), третьим был робот "Энергия" Московского энергетического института (руководитель проф. А. И. Кобрин). Следует отметить оказавшийся на пятом месте робот "Скиф" из Таганрогского государственного робототехнического университета (руководитель проф. В. Х. Пшихопов). Основой такого блестящего успеха явился огромный опыт, накопленный в России во время проведения с 1998 г. ежегодных фестивалей "Мобильные роботы" в Институте механики Московского университета им. М. В. Ломоносова.

В 2008 г. Фестиваль состоялся на базе Московского государственного университета приборостроения и информатики в большом зале Дворца спорта МГУПИ, что позволило провести его по расширенному сценарию и привлечь большое число участников и зрителей. Список участников основных соревнований "Мобильные роботы" увеличился до 12 команд (некоторые представители вузов приезжали для знакомства с условиями и задачами фестиваля без роботов). Первым мероприятием Фестиваля традиционно была научная конференция "Мобильные роботы и мехатронные системы", география участников которой доходила до восточных границ России. Участники школьной сессии представляли различные округа Москвы и Московской области. Во время Фестиваля была проведена выставка "Последние достижения робототехники", программа школьной сессии была представлена по нескольким номинациям, и привлекла много школьников, кроме того, была организована книжная выставка по робототехнике и электронике.

Список литературы

1. **Охоцимский Д. Е., Павловский В. Е., Плахов А. Г., Туганов А. Н.** Система моделирования игры роботов-футболистов // Матер. науч. школы-конф. "Мобильные роботы и мехатронные системы" 5—6 дек. 2000. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 192—203.
2. **Богомолов М. Н.** Алгоритмы абсолютной и относительной навигации мобильного робота в среде с недостоверными маяками // Матер. науч. школы-конф. "Мобильные роботы и мехатронные системы" 3—4 дек. 2001. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 84—93.
3. **Платонов А. К.** Задача "полуслепого инерционного коммивояжера" // Материалы науч. школы-конф. "Мобильные роботы и мехатронные системы" 3—4 дек. 2001. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 94—108.
4. **Девянин Е. А.** О движении колесных роботов // Тр. конф. "Мобильные роботы и мехатронные системы", Москва 1998. С. 169—200.
5. **Охоцимский Д. Е., Мартыненко Ю. Г.** Новые задачи динамики и управления движением мобильных колесных роботов // Успехи механики. Январь—март 2003. Т. 2. № 1. С. 3—46.
6. **Ленский А. В., Мартыненко Ю. Г.** Всероссийский научно-технический фестиваль молодежи "Мобильные роботы" им. проф. Е. А. Девянина // Тр. конф. "Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 3—14.

CONTENTS

- Pogorelov V. A., Klodina T. V.** *Synthesis of the Nonlinear Filtering Algorithms on the Basis of Using Information Criteria* 2
Different aspects of applying information criteria for the synthesis of the estimation equation obtained on the basis of solving the modified Stratonovich equation are studied. Modeling results illustrating the efficiency of the approach proposed are given.
Keywords: theory of information, the a posteriori probability density, the Gaussian approximation.
- Ajukasov R. A.** *The Synthesis Algorithm of Stochastic Delay Systems Optimal Control* 8
The single-step successive approximation method for optimal control of nonlinear stochastic systems with delay is being developed.
Keywords: Optimal control, sdde, stochastic differential delay equation.
- Safronov V. V., Bystrov L. G.** *Construction and Arrangement of Complete Set of Accompanying Matrices for Control Systems Modeling, Analysis and Synthesis* 11
Frobenius and Hessenberg accompanying matrices are often used in sparse state method for research of control systems. In this paper we examine the problem of construction and arrangement of complete matrix set, accompanying the characteristic polynomial of control system, being investigated. A working algorithm for solution of considered problem and necessary relations for definition of number of matrices in discussed set are suggested. Desired location of priority is found by "inflexible" arrangement method and introduction of some special criteria. Numerical example is represented.
Keywords: control systems, sparse state method, characteristic polynomial, accompanying matrices, arrangement method.
- Dudarenko N. A., Polyakova M. V., Ushakov A. V.** *Sufficient Algebraic Conditions of Generalized Synchronism for Multi Input—Multi Output Dynamic Systems* 17
It is considered sufficient algebraic conditions of generalized synchronism for multi input—multi output dynamic systems based on geometric description of synchronous motion. In this note are concerned dynamic systems represented technological processes with many components that achieve general result.
Keywords: multi input-multi output dynamic system, synchronous motion, algebraic conditions, eigen vector.
- Belenki L. B., Borovik S. Yu., Logvinov A. V., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P., Tulupova V. V.** *Methods for Measuring of Blade Faces Displacement in Compressors and Turbines on Basis of Distributed Clusters of Sensors. Part 2. Methods Feasibility* 21
The feasibility of considered in part 1 methods is given. It connected with relative to blade faces placing topology of sensitive elements and their aspect ratio, as well as with using of differential measuring circuits where the sensors functions are changed by using of contactless switching is considered. The effect of switches residual parameters influence on conversion result is given too.
Keywords: compressor and turbine, blade faces, coordinates of displacements, methods for data acquisition, distributed cluster of single-coil eddy-current sensors.
- Dunin-Barkowski I. I.** *Mechatronic Systems for High-Accuracy 3D-inspection Based on Active Machine Vision for Modern Technologies* 31
In this paper the problems of implementation of dimensional inspection systems in modern electronic manufacturing technologies are being studied. This includes surface mount technology (SMT), flip-chip and wafer manufacturing. Requirements for system's measurement accuracy, resolution, inspection speed are formulated. Aspect for building high-speed and accuracy mechatronic system based on active machine vision are presented and solder paste inspection system for SMT production line is depicted.
Keywords: mechatronic system, inspection system, active machine vision system, surface mount technology (SMT), flip-chip technology.
- Alekseev K. V., Maljavin A. A., Palaguta K. A.** *Comparative Analysis of Predictive and Fuzzy Control of Car Movement* 36
The quantity of road failures steady grows. It is promoted by speed grows and intensity of transport streams. Principal causes of road failures are connected with professional experience of the driver and his physiological and psychological condition, with quality of a road covering, with weather conditions and also with a technical condition of the car. Construction of automatic system of a steering control car's movement on the basis of fuzzy logic is investigated in the article. We will get comparison with on automatic system of predictive control.
Keywords: driver, fuzzy control, predictive control, simulator, diagram of structure, operator factors, movement, motion, traffic.

Devjatisiljny A. S., Dorozhko V. M. Control of Safe Movement in the Transport Stream 46
Basic models of car longitudinal control system are represented and classified Simulations demonstrate effective damping of car position deviation in transport flow.

Keywords: car, transport stream, control system, situational control, car position deviation.

Ljakhov S. V., Belous M. M. Special Testing Equipment for Active Safety System 53
The paper presents a testing equipment designed for research of active safety systems of a vehicle. A scheme of the testing equipment, the tasks it is capable to execute and a description of its functioning including the software operation are provided.

Keywords: the vehicle, active safety systems, testing equipment.

Morozov V. V., Zhdanov A. V., Beljaev L. V. Design of Mechatronic Unit of Implantable System of Total Artificial Heart and Its Laboratory-Stand Test 58

In the last decennial events parallel with transplantation is bored develops one of the new directions in technology and medicine creation artificial organ. In decision of this problem possible to select two main trends: constant change the natural organ by prosthetic device; temporary change to functions for a period of treatments heart before reconstruction its functional ability. This article describes design of new mechatronic unit for the implantable systems of total artificial heart. This design made in CAD/CAM/CAE-systems of the module and Systems management, its given description of the pilot model and results its laboratory-stand test.

Keywords: mechatronic module, artificial heart, managerial system, circulation of the blood, noncontact moment engine, valve engine, the test of hydra-dynamic, microcontroller.

Bushmanov A. V., Drjukov A. A. Compression and Strain Processes Simulation of Bone Fragments with Osteosynthesis Apparatus 62

Presented compression and strain osteosynthesis processes by means of open-ended type device control system simulation model.

Keywords: strain, compression, osteosynthesis, reduction, reposition, bone-device system, measuring system, fixative.

Matveev I. A. Algorithm of Human Iris Detection by Interrelations of Brightness Gradient Maxima Projections . . 68
Iris detection method is proposed under condition that coordinates of some point inside pupil are known. The method is based on generating histograms, which are projections of image brightness gradient, and correlating their maxima as possible positions of pupil and iris borders. The method has low calculation complexity and is highly stable against image noises.

Keywords: iris identification, image processing, brightness gradient, projection method.

Burakov V. V. Models and Algorithms in Software Quality Control Problem with Applying to Military Telemedicine Software 71

In this paper the approach to software quality control is described. The paper contains a briefly overview of formal models using by software quality control technology. In paper the quality control algorithm is provided. This algorithm allows quality control in formal manner. The paper contains an overview of an experience by applying described models and algorithm to military telemedicine software quality control.

Keywords: software quality, model of quality, quality assurance, telemedicine software.

Kobrin A. I., Martynenko Yu. G., Pismennaya E. V. Russian Devyanin's scientific and technical festival of youth "Mobile Robotics" 79

Experience of implantation of new innovative technology of the university education linked to carrying out of the All-Russian Devyanin scientific and technical festival of youth is discussed. This technology provides training of highly-skilled personnel with deep practical skills in mechatronics and robotics.

Keywords: mobile robots, educational technology, intellectual control.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

Сдано в набор 04.03.2009. Подписано в печать 16.04.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,88. Заказ 314. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15