

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 6 (123)

ИЮНЬ

2011

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВИТТИХ В. А.
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.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Паршева Е. А., Лежнина Ю. А. Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами 2

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Андреев В. П. Система технического зрения с круговым обзором для мобильного робота 8

Бабаян П. В., Гаврилов А. Н. Использование систем технического зрения при автоматизации производства герконов 15

ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Шаршеналиев Ж. Ш., Брякин И. В. Инерциальные датчики с электромагнитным позиционированием 20

Епишкин А. Е., Шестаков В. М. Способы подавления электромеханического резонанса при пуске вибрационных установок 26

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМОВ

Косенок Б. Б. Аналитические решения пространственных векторных контуров, необходимых для кинематического исследования рычажных механизмов 30

Притыкин Ф. Н. Методы и технологии виртуального моделирования движений адаптивных промышленных роботов с использованием средств компьютерной графики . 34

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Басыров А. Г., Лебедев Д. М., Мاستин А. Б. Энергосберегающая информационная технология конфигурирования бортовых вычислительных систем космических аппаратов 42

Игнатов Н. А. Реализация концепции энергоэффективности в автоматизированных системах управления на основе прогнозирования параметров рынка электрической энергии 48

Лукьянов Д. В., Иващенко В. А. Реконфигурация структур электрических сетей при нарушениях электроснабжения промышленных предприятий 55

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Инсаров В. В., Щербенев А. К. Методика компьютерного моделирования тепловых полей типовых объектов наземных сцен 61

Заведеев А. И. Принципы построения отказоустойчивых систем управления ориентацией аэрокосмических летательных аппаратов 69

Желамский М. В. Магнитный датчик положения и ориентации с шестью степенями свободы для управления подвижными объектами. 75

Contents 79

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

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

УДК 62-506

Е. А. Паршева, д-р техн. наук, проф.,
parsheva-el@yandex.ru,
Ю. А. Лежнина, аспирант,
Астраханский государственный
технический университет,
lejninou@mail.ru

Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами

Исследуется задача робастного управления по выходу нелинейными многосвязными объектами. Для решения задачи используется простой робастный алгоритм управления, позволяющий компенсировать сигнальные и параметрические неопределенности с заданной точностью за конечное время. При этом для формирования управляющих воздействий запрещено использовать измеряемые переменные других локальных подсистем, т. е. осуществляется децентрализованное управление.

Ключевые слова: робастные системы, многосвязные объекты, эталонная модель, децентрализованные алгоритмы, вспомогательный контур, компенсация возмущений

Введение

Исследование нелинейных объектов, функционирующих в условиях сигнальной и параметрической неопределенности, является актуальной проблемой современной теории управления. В частности, такая задача актуальна в машиностроении, оптическом производстве, судостроении и т. д. Решению данной задачи посвящены обширные исследования, в которых были предложены различные методы и подходы. Один из принципов построения систем управления основан на динамической компенсации. В этом случае сигналы управления формируются таким образом, чтобы подавить влияние возмущений на систему. Основными подходами, позволяющими осуществлять компенсацию ограниченных возмущений, являются методы, использующие внутреннюю модель возмущений [1, 2], оценку производных неизмеряемых сигналов [3], вспомогательный контур [4] для формирования сигнала, содержащего информацию о возмущениях.

В данной статье предлагается обобщение оригинального подхода [4] на многосвязные системы. Проблема получения информации о недоступных измерению переменных состояния объекта решается с использованием наблюдателя.

Постановка задачи

Рассмотрим взаимосвязанную систему, динамические процессы в k локальных подсистемах которой описываются уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + \Psi_i(y) c_i + \\ &+ B_i \sigma_i(y) u_i(t) + f_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^k S_{ij} y_j; \quad (1) \\ y_i(t) &= L_i x_i \quad i = \overline{1, k}, \end{aligned}$$

где $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния объекта управления; $y_i(t)$, $u_i(t)$ — измеряемые скалярные выход и вход i -й локальной подсистемы; $f_i(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор неизвестных ограниченных возмущающих воздействий; матричная функция $\Psi_i(y)$ и нелинейность $\sigma_i(y)$ удовлетворяют ограничениям предположений; c_i — вектор

неизвестных параметров; $A_i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -a_{n_i-1} & \dots & -a_0 \end{bmatrix}$,

$B_i^T = [0, \dots, 0, b_0, \dots, b_{m_i}]$, $L_i = [1, 0, \dots, 0]$ — матрицы, элементы которых зависят от вектора неизвестных параметров $\xi \in \Xi$, такие, что выполняется

$$L_i(\lambda I - A_i)^{-1} B_i = \frac{k_i R_i(\lambda)}{Q_i(\lambda)} \quad (\lambda \text{ — комплексная пере-}$$

менная в преобразовании Лапласа); Ξ — множество возможных значений коэффициентов полиномов $Q_i(\lambda)$, $R_i(\lambda)$ и числа k_i .

Формулируются две традиционные задачи: задача стабилизации и задача слежения за эталонным сигналом.

1. Требуется синтезировать децентрализованную систему стабилизации, обеспечивающую выполнение целевого условия

$$|y_i(t)| < \delta, \text{ при } t > T. \quad (2)$$

Децентрализованное управление для рассматриваемых систем определяется как задача нахождения k локальных блоков управления, каждому из которых доступна только текущая информация о системе.

2. Требуется синтезировать систему управления, обеспечивающую выполнение целевого условия

$$|e_i(t)| = |y_i(t) - y_{mi}(t)| < \delta, \text{ при } t > T. \quad (3)$$

При этом желаемое качество переходных процессов в подсистемах задается уравнениями локальных эталонных моделей

$$Q_{mi}(P)y_{mi}(t) = k_{mi}r_i(t), \quad i = \overline{1, k}, \quad \deg Q_{mi} = n_i - m_i \quad (4)$$

Здесь $Q_{mi}(P)$ — линейные дифференциальные операторы, такие, что полиномы $Q_{mi}(\lambda)$ — гурвицевы; $P = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования; $r_i(t)$ — скалярные ограниченные задающие воздействия.

Предположения. А.1. Полиномы $R_i(\lambda)$ — гурвицевы. **А.2.** Известны порядки полиномов $\deg Q_i(\lambda) = n_i$, $\deg R_i(\lambda) = m_i$, относительная степень подсистем $\gamma_i = n_i - m_i > 1$. **А.3.** Известно множество Ξ возможных значений вектора $\xi \in \Xi$. **А.4.** Возмущающие воздействия и $n_i - m_i - 1$ их производных, выходные переменные эталонной модели и $n_i - m_i$ их производных являются ограниченными функциями. **А.5.** Не допускается использование производных сигналов $y_i(t)$, $u_i(t)$. **А.6.** Элементы матрицы $\Psi_i(y)$ удовлетворяют глобальному условию Липшица и являются гладкими функциями. **А.7.** Нелинейность σ_i известна и $\sigma_i \neq 0$ для любых $y \in \mathfrak{R}$.

Система стабилизации

Для получения результата преобразуем уравнение объекта управления (1) к виду

$$Q_i(P)y_i(t) = k_i R_i(P) \sigma_i u_i(t) + \sum_{l=1}^n P^{n-l} \sum_{j=1}^n \Psi_{ij} c_{ij} + \sum_{l=1}^n P^{n-l} f_{il} + \sum_{j=1, i \neq j}^k S_{ij}(P) y_j(t). \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет применить известную параметризацию [5]. Для этого выберем гурвицевы полиномы $D_i(\lambda)$, $M_i(\lambda)$ так, чтобы выполнялось

$$M_i(P) Q_{mi}(P) = Q_i(P) D_i(P) + \Delta Q_i(P),$$

где $\deg D_i(\lambda) = n_i - m_i - 1$, $\deg M_i(\lambda) = n_i - 1$ и $\deg \Delta Q_i(\lambda) = n_i - 1$. Используя данное соотношение, приведем уравнение объекта управления (5) к виду

$$Q_{mi}(P) y_i(t) = k_i \sigma_i u_i(t) + \left(\frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) + \frac{N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \frac{N_{3i}(P)}{M_i(P)} z_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^n \frac{\tilde{S}_{ij}(P)}{M_i(P)} y_j \right), \quad (6)$$

где $N_{1i}(\lambda)$ — остаток от деления $k_i R_i(\lambda) D_i(\lambda)$ на $M_i(\lambda)$, $N_{2i}(\lambda) = \Delta Q_i$, $N_{3i}(\lambda)$, $D_i(\lambda)$, $\tilde{S}_{ij}(\lambda) = S_{ij}(\lambda) D_i(\lambda)$ — полиномы степеней $n_i - 2$, $n_i - 1$, $n_i - m_i - 1$, $n_i - 1$ соответственно; $z_i(t) = \sum_{l=1}^n P^{n-l} \sum_{j=1}^n \Psi_{ij} c_{ij} + \sum_{l=1}^n P^{n-l} f_{il}$ — ограниченные сигналы в силу сделанных предположений.

Для компенсации возмущающих воздействий используем оригинальную схему управления [4]. Выберем локальный закон управления в виде

$$u_i(t) = \frac{\alpha_i}{k_{mi} \sigma_i} v_i(t). \quad (7)$$

Здесь $\alpha_i > 0$; $v_i(t)$ — дополнительное управляющее воздействие. Тогда из (6) получим уравнение замкнутой системы

$$Q_{mi}(P) y_i(t) = v_i(t) + \varphi_i(t),$$

где

$$\varphi_i = \frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) + \frac{N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \frac{N_{3i}(P)}{M_i(P)} z_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^k \frac{\tilde{S}_{ij}(P)}{M_i(P)} y_j + \left(\frac{k_i \alpha_i}{k_{mi}} - 1 \right) v_i.$$

В сигнале $\varphi_i(t)$ сконцентрированы все составляющие, действие которых желательно скомпенсировать. Для этого сигнал нужно выделить. Введем вспомогательный контур

$$Q_{mi}(P) \tilde{y}_i(t) = v_i(t) \quad (8)$$

и составим уравнение относительно сигнала рас- согласования $\vartheta_i(t) = y_i(t) - \tilde{y}_i(t)$, тогда

$$Q_{mi}(P) \vartheta_i(t) = \varphi_i(t).$$

Если измерению доступны γ_i производных выходного сигнала $y_i(t)$, то, задав закон изменения вспомогательного управляющего воздействия в виде

$$v_i(t) = -Q_{mi}(P) \vartheta_i(t) = -\varphi_i(t), \quad (9)$$

получим уравнение замкнутой системы

$$Q_{mi}(P) y_i(t) = 0. \quad (10)$$

Из (9) видно, что если $\frac{k_i \alpha_i}{k_{mi}} - 1 < 0$, то замкнутая система будет содержать положительную обратную связь, т. е. будет структурно неустойчивой. Поэтому коэффициент α_i выбирается из условия

$$\inf_{k_i \in \Xi} k_i \alpha_i - k_{mi} > 0.$$

Покажем, что все сигналы в замкнутой системе ограничены. Из (10) имеем, что сигнал $y_i(t)$ и γ_i его производных ограничены. Тогда из условий предположений и гурвицевости $M_i(\lambda)$ получаем, что составляющая

$$\varphi_{1i} = \frac{N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \frac{N_{3i}(P)}{M_i(P)} z_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^k \frac{\tilde{S}_{ij}(P)}{M_i(P)} y_j$$

есть величина ограниченная. Далее, необходимо показать ограниченность выбранного управляющего воздействия. Для этого подставим выражение $\varphi_i(t)$ в (9) и разрешим полученное уравнение относительно $v_i(t)$:

$$v_i(t) = -\frac{k_{mi}}{k_i \alpha_i} \left(\varphi_{1i}(t) + \frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) \right). \quad (11)$$

Подставим это значение в уравнение (7) и разрешим его относительно $u_i(t)$:

$$\begin{aligned} k_i \sigma_i u_i(t) + \frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) &= \\ = k_i \frac{R_i(P) D_i(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) &= -\varphi_{1i}(t). \end{aligned}$$

Тогда из гурвицевости $M_i(\lambda)$, $R_i(\lambda)$, $D_i(\lambda)$ и ограниченности $\varphi_{1i}(t)$ следует ограниченность локального управляющего воздействия $u_i(t)$.

В связи с тем, что по условию сформулированной задачи измерение производных недопустимо, сформируем локальный закон дополнительного управляющего воздействия $v_i(t)$ в виде

$$v_i(t) = -Q_{mi}(P) \bar{\vartheta}_i(t), \quad (12)$$

где $\bar{\vartheta}_i(t)$ является оценкой функции $\vartheta_i(t)$. Из (12) видно, что для реализации закона управления (7) требуется получить оценку сигнала рассогласования и γ_i его производных. Для этого воспользуемся наблюдателем [6]

$$\dot{\zeta}_i(t) = G_{0i} \zeta_i(t) + H_i (\bar{\vartheta}_i - \vartheta_i); \quad (13)$$

$$\bar{\vartheta}_i = L_{0i} \zeta_i, \quad i = \overline{1, M}.$$

Здесь $\zeta_i \in R^{\gamma_i}$; $L_{0i} = [1, 0, \dots, 0]$; $H_i^T = \left[-\frac{h_{1i}}{\mu}, \dots, -\frac{h_{\gamma_i}}{\mu} \right]$; $G_{0i} = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma_i-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; вектор H_i выбирается так, чтобы матрица $G_i = G_{0i} + \bar{H}_i L_i$ была гурвицевой, где $\bar{H}_i^T = [h_{1i}, \dots, h_{\gamma_i}]$; $\mu > 0$ — малое число. Очевидно, что теперь закон управления технически реализуем, так как содержит известные или измеряемые величины.

Утверждение 1. Если выполнены предположения, то существуют числа $\mu_0 > 0$, $T_0 > 0$ такие, что при $\mu \leq \mu_0$, $T \geq T_0$ алгоритм управления (7), (12), (13) обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Следует отметить, что, выбирая величину μ малой, можно добиться наперед заданного значения величины δ из целевого условия (2).

Доказательство. Введем вектор $\theta_i^T(t) = [\vartheta_i(t)$,

$\dot{\vartheta}_i(t), \dots, \overset{(\gamma_i-1)}{\vartheta}_i(t)]$ и вектор отклонений производных

от их оценок $\eta_i(t) = \Gamma_i^{-1} (\zeta_i(t) - \theta_i(t))$, где Γ_i — блочно-диагональная матрица $\Gamma_i = \text{diag}\{\mu^{\gamma_i-1}, \mu^{\gamma_i-2}, \dots, \mu, 1\}$. Из уравнения (13) получим

$$\dot{\eta}_i(t) = \frac{1}{\mu} G_i \eta_i(t) + b_{0i} \overset{(\gamma_i)}{\vartheta}_i(t);$$

$$\Delta(t) = \bar{\vartheta}_i(t) - \vartheta_i(t) = \mu^{\gamma_i-1} L_{0i} \eta_i(t), \quad (14)$$

где $b_{0i}^T = [0, \dots, 0, -1]$. Тогда, принимая во внимание, что дополнительное управляющее воздействие формируется в виде (12), преобразуем уравнение замкнутой системы (6) к виду

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_{mi} x_i(t) + \mu^{\gamma_i-1} b_i q_{mi}^T \bar{\Delta}_i(t), & y_i(t) = L_i x_i(t); \\ \mu_1 \dot{\eta}_i(t) = G_i \eta_i(t) + \mu_2 b_{0i} \overset{(\gamma_i)}{\vartheta}_i(t); \\ \Delta_i(t) = \mu^{\gamma_i} L_{0i} \eta_i(t), & i = \overline{1, k}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\bar{\Delta}_i(t) = \text{col}(\eta_{i0}(t), \eta_{i1}(t), \dots, \eta_{i\gamma_i}(t))$; $\eta_{ik}(t) = P^k \eta_i(t)$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu$; A_{mi} — гурвицева числовая матрица, заданная в форме Фробениуса, сопровождающая полином $Q_{mi}(\lambda)$; $b_i^T = [0, \dots, 0, 1]$; q_{mi} — вектор, элементы которого являются коэффициентами полинома $Q_{mi}(\lambda)$. Получили сингулярно-возмущенную систему, так как μ — достаточно малое число. Воспользуемся леммой [7].

Лемма [7]. Если система описывается уравнением

$\dot{x} = f(x, \mu_1, \mu_2)$, $x \in R^{m_1}$, где $f(t)$ — непрерывная функция, липшицева по x , и при $\mu_2 = 0$ имеет ограниченную замкнутую область диссипативности

$\Omega_1 = \{x | F(x) < \tilde{C}\}$, где $F(x)$ — положительно-определенная, непрерывная кусочно-гладкая функция, то существует $\mu_0 > 0$ такое, что при $\mu_2 \leq \mu_0$ исходная система имеет ту же область диссипативности Ω_1 ,

если для некоторых чисел \tilde{C}_1 и $\bar{\mu}_1$ при $\mu_2 = 0$ выполнено условие

$$\sup_{|\mu_1| \leq \bar{\mu}_1} \left(\left(\frac{\partial F(x)}{\partial x} \right)^T f(x, \mu_1, 0) \right) \leq -\tilde{C}_1, \quad \text{при } F(x) = \tilde{C}. \quad (16)$$

В данном случае при $\mu_2 = 0$ в (15) имеем асимптотически устойчивую систему по переменным $x_i(t)$ и $\eta_i(t)$, поскольку матрицы A_{mi} , G_i — гурвицевы. Получили ситуацию, которая имела место при измерении производных, т. е. $\lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) = 0$. Было показано, что при этом условии все сигналы в системе ограничены. Следовательно, существует некоторая область $\Omega = \{x_i(t), \eta_i(t) : F(x_i, \eta_i) < C_1\}$, где

сигналы $x_i(t)$, $\eta_i(t)$, $\vartheta_i(t)$ не выходят за ее пределы при некоторых начальных условиях из области Ω_0 . Очевидно, что условие (16) выполнено, если в качестве F_i взять функцию Ляпунова

$$V(x_i(t), \eta_i(t)) = \sum_{i=1}^k (x_i^T(t) H_{1i} x_i(t) + \eta_i^T(t) H_{2i} \eta_i(t)), \quad (17)$$

где положительно-определенные симметричные матрицы H_{1i} , H_{2i} определяются из решения уравнений

$$H_{1i} A_{mi} + A_{mi}^T H_{1i} = -\rho_{1i} I - Q_{1i}, \quad H_{2i} G_i + G_i^T H_{2i} = -\rho_{2i} I - Q_{2i},$$

где I — единичная матрица соответствующего порядка; $\rho_{1i} > 0$, $\rho_{2i} > 0$, $Q_{1i} = Q_{1i}^T > 0$, $Q_{2i} = Q_{2i}^T > 0$.

Таким образом, в соответствии с леммой, существует $\mu_0 > 0$ такое, что при $\mu < \mu_0$ областью диссипативности системы (15) остается область Ω . Тогда, принимая во внимание гурвицевость матриц G_i , A_{mi} ,

$$\text{получим } \sup_t \left| \vartheta_i^{(\gamma_i)}(t) \right| < k_{3i}, \quad \sup_t |\bar{\Delta}_i| < k_{4i}.$$

Однако необходимо отметить, что сохранение области диссипативности не гарантирует, что множество притяжения Ω_1 останется в сингулярно возмущенной системе тем же. Вычислим полную производную от функции (17) на траекториях системы (15), положив $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_i(t), \eta_i(t)) &= \sum_{i=1}^k (-\rho_{1i} \|x_i(t)\|^2 - x_i^T(t) Q_{1i} x_i(t) + \\ &+ 2x_i^T(t) H_{1i} \mu^{\gamma_i-1} b_i q_{mi}^T \bar{\Delta}_i(t) - \frac{\rho_{2i}}{\mu_0} \|\eta_i(t)\|^2 - \\ &- \frac{1}{\mu_0} \eta_i^T(t) Q_{2i} \eta_i(t) + 2\eta_i^T(t) H_{2i} b_{0i} \vartheta_i^{(\gamma_i)}(t)). \end{aligned}$$

Воспользуемся оценками

$$\begin{aligned} 2\mu_0^{\gamma_i-1} x_i^T H_{1i} b_i q_{mi}^T \bar{\Delta}_i &\leq \mu_0^{\gamma_i-1} \|H_{1i} b_i\|^2 \|q_{mi}\|^2 \|x_i\|^2 + \\ &+ \mu_0^{\gamma_i-1} |\bar{\Delta}_i|^2 k_{4i}^2 \leq \mu_0^{\gamma_i-1} \|H_{1i} b_i\|^2 \|x_i\|^2 + \mu_0^{\gamma_i-1} k_{4i}^2; \\ 2\eta_i^T H_{2i} b_{0i} \vartheta_i^{(\gamma_i)} &\leq \frac{1}{\mu_0} \|H_{2i} b_{0i}\|^2 \|\eta_i\|^2 + \mu_0 \left| \vartheta_i^{(\gamma_i)}(t) \right|^2 \leq \\ &\leq \frac{1}{\mu_0} \|H_{2i} b_{0i}\|^2 \|\eta_i\|^2 + \mu_0 k_{3i}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -x_i^T(t) Q_{1i} x_i(t) &\leq -\lambda_{\min}(Q_{1i}) \|x_i(t)\|^2 \leq \\ &\leq -\frac{\lambda_{\min}(Q_{1i})}{\lambda_{\max}(H_{1i})} x_i^T(t) H_{1i} x_i(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\eta_i^T(t) Q_{2i} \eta_i(t) &\leq -\lambda_{\min}(Q_{2i}) \|\eta_i(t)\|^2 \leq \\ &\leq -\frac{\lambda_{\min}(Q_{2i})}{\lambda_{\max}(H_{2i})} \eta_i^T(t) H_{2i} \eta_i(t), \end{aligned}$$

тогда

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\sigma_1 V - \sum_{i=1}^k \left(\|\eta_i\|^2 \left(\frac{\rho_{2i}}{2\mu_0} - \frac{1}{\mu_0} \|H_{2i} b_{0i}\|^2 \right) \right) + \\ &+ \|x_i\|^2 \left(\frac{\rho_{1i}}{2} - \mu_0^{\gamma_i-1} \|H_{1i} b_i\|^2 \|q_{mi}\|^2 \right) - \mu_0^{\gamma_i-1} k_{4i}^2 - \mu_0 k_{3i}^2. \end{aligned}$$

Всегда существует число $\mu_0 > 0$, обеспечивающее положительность чисел в скобках. Тогда

$$\dot{V} \leq -\sigma_1 V + \sum_{i=1}^k (\mu_0^{\gamma_i-1} k_{4i}^2 + \mu_0 k_{3i}^2),$$

где $\sigma_1 = \min \left\{ \frac{\lambda_{\min}(Q_{1i})}{\lambda_{\max}(H_{1i})}, \frac{\lambda_{\min}(Q_{2i})}{\lambda_{\max}(H_{2i})} \right\}$. Решим полученное неравенство:

$$V(x_i(t), \eta_i(t)) \leq V(0, 0) e^{-\sigma_1 t} + \frac{\mu_0}{\sigma_0} \sum_{i=1}^k (\mu_0^{\gamma_i-2} k_{4i}^2 + k_{3i}^2).$$

Отсюда видно, что, выбирая μ_0 достаточно малым числом, получим область притяжения

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \left\{ x_i(t), \eta_i(t) : V(x_i(t), \eta_i(t)) \leq \right. \\ &\left. \leq \frac{\mu_0}{\sigma_0} \sum_{i=1}^k (\mu_0^{\gamma_i-2} k_{4i}^2 + k_{3i}^2) \right\}. \end{aligned}$$

Следовательно, целевое условие (2) выполнено. Отметим, что, изменяя $\mu \leq \mu_0$, можно получить требуемую величину δ в целевом условии.

Система управления с эталонной моделью

Принимая во внимание уравнение эталонной модели (4) и параметризованное уравнение объекта (6), составим уравнение для ошибки $e_i(t) = y_i(t) - y_{mi}(t)$:

$$\begin{aligned} Q_{mi}(P) e_i(t) &= \\ &= k_i \sigma_i u_i(t) + \left(\frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) + \frac{N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \right. \\ &+ \left. \frac{N_{3i}(P)}{M_i(P)} z_i(t) - k_{mi} r_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^k \frac{\tilde{S}_{ij}(P)}{M_i(P)} y_j \right), \quad (18) \end{aligned}$$

где $N_{1i}(\lambda)$, $N_{2i}(\lambda)$, $N_{3i}(\lambda)$, $\tilde{S}_{ij}(\lambda)$ — полиномы степеней $n_i - 2$, $n_i - 1$, $n_i - m_i - 1$, $n_i - 1$, соответственно. Выберем локальный закон управления в виде (7). Тогда получим уравнение замкнутой системы

$$Q_{mi}(P) e_i(t) = v_i(t) + \varphi_i(t),$$

где

$$\varphi_i = \frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} \sigma_i u_i(t) + \frac{N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \frac{N_{3i}(P)}{M_i(P)} z_i(t) - k_{mi} r_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^k \frac{\tilde{S}_{ij}(P)}{M_i(P)} y_j + \left(\frac{k_i \alpha_i}{k_{mi}} - 1 \right) v_i$$

Сигнал $\varphi_i(t)$ содержит все компоненты, действие которых на ошибку желательно скомпенсировать. Для этого выделим сигнал с помощью вспомогательного контура

$$Q_{mi}(P) \tilde{e}_i(t) = v_i(t) \quad (19)$$

и составим уравнение относительно сигнала рассогласования $\vartheta_i(t) = e_i(t) - \tilde{e}_i(t)$, тогда

$$Q_{mi}(P) \vartheta_i(t) = \varphi_i(t).$$

Если измерению доступны γ_i производных сигнала рассогласования, то, задав закон изменения вспомогательного управляющего воздействия в виде (9), получим уравнение замкнутой системы

$$Q_{mi}(P) e_i(t) = 0. \quad (20)$$

Все сигналы, включая управляющее воздействие, в замкнутой системе (20) ограничены. Это следует из сделанных предположений и рассуждений, проведенных при доказательстве ограниченности сигналов в системе стабилизации.

В связи с тем, что по условию сформулированной задачи измерение производных недопустимо, то сформулируем локальный закон дополнительного управляющего воздействия $v_i(t)$ в виде (12), где оценка сигнала рассогласования получена с наблюдателя (13). Очевидно, что теперь закон управления технически реализуем, так как содержит известные или измеряемые величины.

Принимая во внимание то, что дополнительное управляющее воздействие формируется в виде (12), преобразуем уравнение замкнутой системы в векторно-матричную форму, в результате получим следующую систему уравнений замкнутой системы;

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_i(t) = A_{mi} \varepsilon_i(t) + \mu^{\gamma_i - 1} b_i q_{mi}^T \bar{\Delta}_i(t), e_i(t) = L_i \varepsilon_i(t); \\ \mu_1 \dot{\eta}_i(t) = F_i \eta_i(t) + \mu_2 b_{0i} \overset{(\gamma_i)}{\vartheta}_i(t); \\ \Delta_i(t) = \mu^{\gamma_i} L_{0i} \eta_i(t), i = \overline{1, k}, \end{cases} \quad (21)$$

где $\bar{\Delta}_i(t) = \text{col}(\eta_{i0}(t), \eta_{i1}(t), \dots, \eta_{i\gamma_i}(t)); \eta_{ik}(t) = P^k \eta_i(t)$.

Для уравнений (21) справедливо утверждение 1 с заменой целевого условия (2) на (3) и доказывається аналогично. Таким образом, система сохраняет свойство диссипативности несмотря на то, что структура управления осталась неизменной.

Пример

Рассмотрим динамическую систему, состоящую из двух подсистем:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + \Psi_i(y) c_i + B_i \sigma_i(y) u_i(t) + \\ &+ f_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^k S_{ij} y_j(t); \end{aligned}$$

$$y_i(t) = L_i x_i(t), i = \overline{1, 2};$$

$$\Psi_i(y) = \begin{bmatrix} \ln(2y_i^2) & \sin y_i \\ \ln(2y_i^2) & \sin y_i \\ \ln(2y_i^2) & \sin y_i \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 5 & 5 & -20 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 10 & 13 & -16 \end{bmatrix},$$

$$\sigma_i(y) = 2y_i^2, S_{ij} = 3, f_1(t) = 3 + \sin 0,1t + \sin 10t, f_2(t) = 2 + \sin 0,3t + \sin 10t,$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 11 \end{bmatrix}, c_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, c_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Задан класс неопределенности

$$\begin{aligned} \underline{a}_i &\leq a_i \leq \bar{a}_i, \underline{b}_i \leq b_i \leq \bar{b}_i, \\ \underline{a}_i &= -30, \bar{a}_i = 30, \underline{b}_i = 2, \bar{b}_i = 10. \end{aligned}$$

Уравнения эталонных моделей имеют вид

$$(P^2 + 2P + 1)y_{mi}(t) = r_i(t), r_i(t) = 1 + \sin(0,6t).$$

Уравнение вспомогательного контура

$$(P^2 + 2P + 1)\tilde{y}_i = v_i.$$

$$\begin{aligned} \text{Возьмем наблюдатель } \dot{\zeta}_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \zeta_i + \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ \mu & \mu^2 \end{bmatrix}^T \times \\ &\times (\bar{\vartheta}_i(t) - \vartheta_i), \bar{\vartheta}_i = [1 \ 0] \zeta_i. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Закон управления формируется в виде } u_i(t) &= \\ &= -\frac{\alpha_i}{2y_i^2} (\bar{\zeta}_1(t) + 2\dot{\zeta}_1(t) + \ddot{\zeta}_2(t)). \end{aligned}$$

Начальные условия

$$\begin{aligned} \alpha_i &= 1, \mu = 0,01, y_1(0) = \dot{y}_1(0) = \ddot{y}_1(0) = 2, \\ y_2(0) &= \dot{y}_2(0) = \ddot{y}_2(0) = -1. \end{aligned}$$

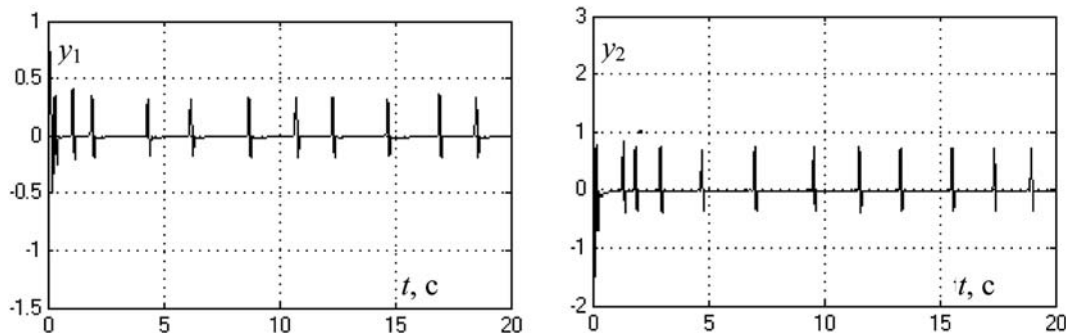


Рис. 1. Траектории выхода

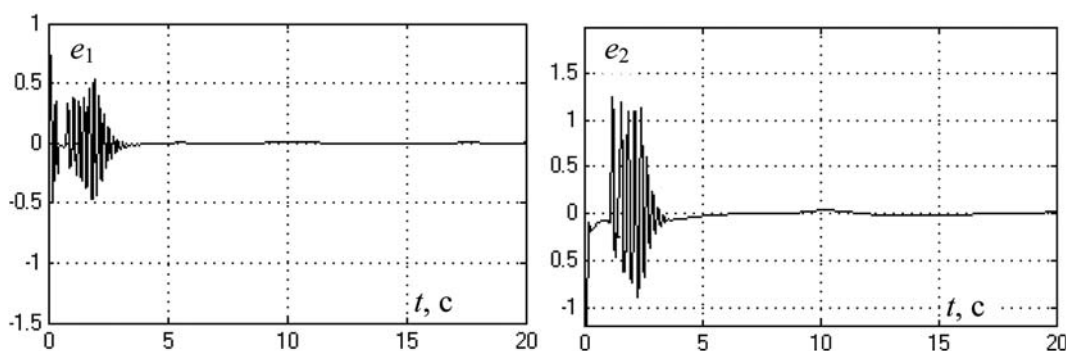


Рис. 2. Траектории ошибок

На рис. 1 приведены результаты моделирования системы стабилизации, на рис. 2 — переходной процесс по ошибке в случае слежения за эталонным сигналом. Рассмотренные примеры подтверждают теоретические выводы.

Заключение

Таким образом, в классе алгоритмов робастного управления предложен подход, позволяющий решать задачу стабилизации с компенсацией возмущающих воздействий для многосвязных систем, когда измерению недоступны производные входных и выходных сигналов локальных подсистем. При этом исключено формирование вектора регрессии, что значительно понижает порядок замкнутой системы. К недостаткам предлагаемого алгоритма следует отнести отсутствие аналитически обоснованного выбора параметров μ и α_j . Однако они легко подбираются на этапе проектирования при моделиро-

вании таким образом, чтобы обеспечить заданную динамическую ошибку.

Список литературы

1. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. Ч. 1. Объекты с известными параметрами // *АиТ*. 2004. № 10. С. 13—24.
2. Никифоров В. О. Наблюдатели внешних возмущений. Ч. 2. Объекты с неизвестными параметрами // *АиТ*. 2004. № 11. С. 40—48.
3. Никифоров В. О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 1994. № 4. С. 69—73.
4. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // *АиТ*. 2007. № 7. С. 103—115.
5. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
6. Atassi A. N., Khalil H. N. A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems // *IEEE Trans. on Automatic Control*. 1999. Vol. 44. № 9. P. 1672—1687.
7. Брусин В. А. Об одном классе сингулярно возмущенных адаптивных систем // *АиТ*. 1995. № 4. С. 119—127.

УДК 681.518.3

В. П. Андреев, канд. физ.-мат. наук,
зам. директора по научным вопросам,
Международная лаборатория "Сенсорика",
andreev@npptema.ru

Система технического зрения с круговым обзором для мобильного робота¹

Исследуется возможность использования системы технического зрения (СТЗ) кругового обзора для решения ряда сложных навигационных задач мобильным роботом в автономном режиме. Круговой обзор обеспечивается установкой в оптическую систему зеркального конуса, с помощью которого на фотоматрице стандартной телекамеры формируется изображение окружающей среды. Описаны алгоритмы обнаружения и локализации специальных объектов (маяков) в поле зрения СТЗ, основанные на использовании межкадровой разности. Предложены новые технические решения при создании СТЗ и соответствующие алгоритмы анализа видеоданных для формирования цели управления средствами бортовых систем мобильного робота.

Ключевые слова: система технического зрения, мобильный робот, анализ изображений, межкадровая разность, зеркальный конус

Введение

При разработке мобильных роботов с супервизорным управлением, автономно выполняющих ряд задач навигации, возникает целый комплекс вопросов, связанных с созданием системы технического зрения (СТЗ), обеспечивающей круговой обзор рабочей зоны, и разработкой соответствующего программного обеспечения (ПО) для бортового вычислителя, выполняющего в масштабе реального времени анализ видеоданных и автоматическое формирование цели управления. Использование многокамерной СТЗ наталкивается на проблему обработки на борту в реальном масштабе времени огромного потока видеoinформации, что требует от бортовых вычислительных устройств соответствующих ресурсов. В то же время для автономного решения целого ряда локомотивных задач не требуется наличия изображений окружающей среды,

полученных с высоким разрешением. Кроме того, в автономных системах для алгоритмов анализа изображений нет необходимости создавать интерфейс, аналогичный системе с человеком-оператором. Поэтому следует обратить внимание на СТЗ с одной телекамерой, обеспечивающие круговой обзор с помощью специальных оптических систем, в которых изображение окружающей среды сразу проецируется на фотоматрицу телекамеры. Для создания такой оптической системы можно использовать зеркальный конус. Задачи автономной навигации по изображениям зоны действия могут быть решены только в том случае, если на этих изображениях можно выделить интересующие нас объекты и определить их пространственное расположение. Исследованию возможности решения задач выделения и локализации объектов на изображениях, полученных с помощью СТЗ с зеркальным конусом, посвящена данная статья.

Аппаратное устройство мобильного робота "Кронус"

Для решения поставленной задачи и практического исследования эффективности разработанных методов и алгоритмов был изготовлен робот "Кронус" класса "Монотип", предназначенный для участия в соревнованиях Фестиваля "Мобильные роботы". Его аппаратное устройство приведено на рис. 1. Для обеспечения кругового обзора в оптическую СТЗ робота установлен зеркальный конус, с помощью которого круговая панорама проецируется на поле фотоматрицы телекамеры. Подобная схема описана в работах [1–3], а различные аспекты ее функционирования приведены в работах [4, 5]. Основная задача СТЗ робота — обнаружение специ-

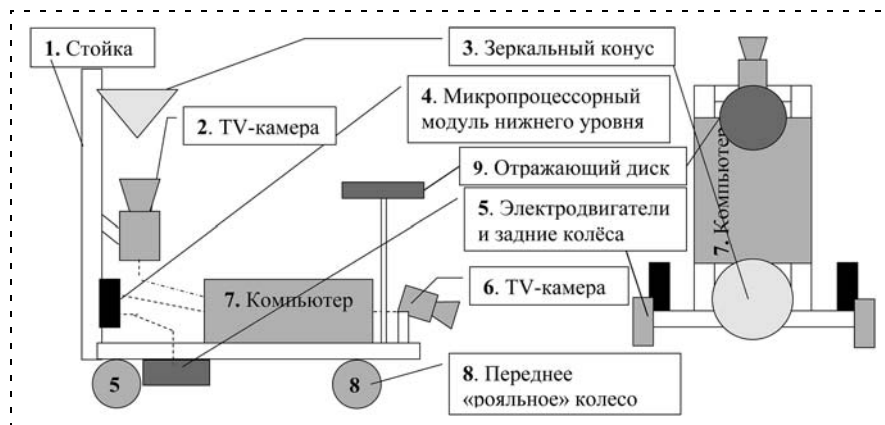


Рис. 1. Аппаратное устройство робота "Кронус"

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-07-00612-а.

альных ИК маяков, определение направления на эти маяки и расстояния до них [6].

Для преобразования оптического изображения в электрический видеосигнал в СТЗ используется черно-белая телекамера с матрицей ПЗС формата 795×596 и разрешением 600 линий. Для преобразования аналогового видеосигнала в цифровую форму используется фреймграббер (frame grabber), который подключается к шине PCI персонального компьютера (ПК). Это устройство выполняет дискретизацию и квантование стандартного видеосигнала, поступающего на вход с частотой 50 телевизионных полукадров в секунду (при чересстрочной развертке). В результате каждый полукадр представляется в памяти ПК в виде двумерного целочисленного массива, значения элементов которого находятся в диапазоне $0 \dots 255$. Дальнейшей обработке подвергается лишь центральная часть каждого телевизионного полукадра в пределах квадратного "окна" размером 256×256 элементов дискретного раstra (пикселей).

Оптическая система с зеркальным конусом

На рис. 2 приведен схематический вид оптической системы. При ее идеальном исполнении ось зеркального конуса вертикальна и совпадает с оптической осью объектива, его оптический центр лежит на этой оси, плоскость фотоматрицы телекамеры нормальна оси симметрии конуса.

Приняты следующие обозначения: M — маяк; O — оптический центр объектива телекамеры; P — фокальная плоскость; K — зеркальный конус; ΦM —

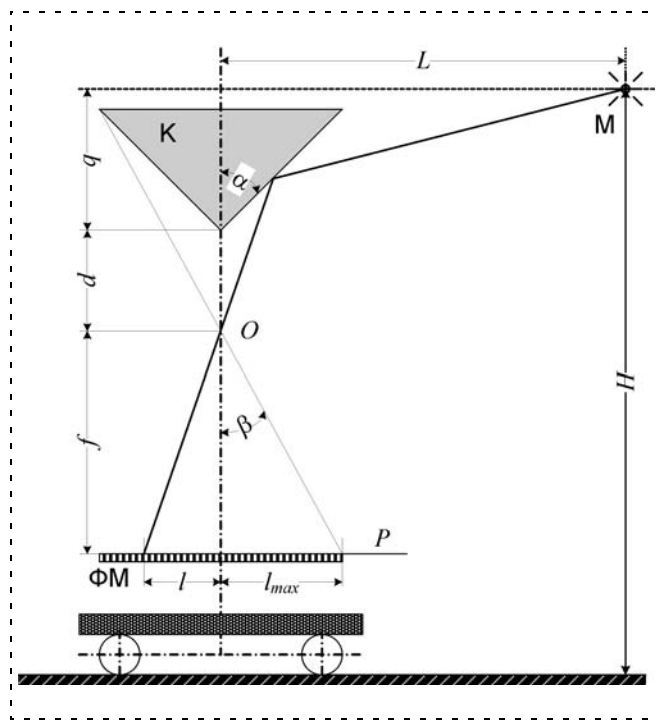


Рис. 2. Схематический вид оптической системы робота "Кронус"

фотоматрица телекамеры; H — высота размещения маяков ($H = \text{const}$ для всех маяков); q — расстояние от вершины конуса до уровня маяков; d — расстояние от оптического центра до вершины конуса; f — фокусное расстояние объектива; α — половинный угол при вершине конуса; β — угол зрения объектива; L — расстояние от оси конуса до маяка; l — расстояние от оси конуса до изображения маяка; l_{max} — половина физического размера фотоматрицы ΦM . Крепления видеокамеры и конуса к корпусу робота снабжены механизмами регулировки, которые позволяют в некоторых пределах изменять их расположение и ориентацию, что требуется для настройки системы.

В первом варианте конструкции оптической системы [6] угол при вершине конуса равен 90° ($\alpha = \pi/4$), и вершина конуса расположена ниже плоскости маяков ($q < 0$). Такая СТЗ обладает следующими свойствами: чем дальше расположен маяк, тем его проекция ближе к центру фотоматрицы, а его точка отражения, соответственно, ближе к вершине конуса, где высокая кривизна отражающей поверхности приводит к сильным искажениям геометрии. В центр фотоматрицы проецируются бесконечно удаленные маяки, их точки отражения расположены вблизи вершины конуса, где система координат является вырожденной. Для этого варианта имеют место следующие формулы зависимости расстояния L до маяка и его азимута φ от радиуса l и азимута ψ проекции маяка на фокальную плоскость:

$$\begin{cases} L(l) = \frac{lq \cos 2\alpha - f q \sin 2\alpha - l d}{l \sin 2\alpha + f \cos 2\alpha}, \\ \varphi = \psi = \pi. \end{cases}$$

Во втором варианте конструкции оптической системы [7] угол при вершине конуса больше 90° ($\alpha > \pi/4$), и вершина конуса расположена выше плоскости маяков ($q > 0$). Отличие данного варианта от предыдущего состоит в том, что теперь чем дальше расположен маяк, тем его изображение ближе к краям фотоматрицы, а точка отражения на конусе — ближе к основанию конуса, где кривизна отражающей поверхности существенно меньше, чем при вершине конуса. Соответственно улучшается энергетика видеосигнала от дальних маяков за счет того, что их точка отражения располагается на участке конуса с меньшей кривизной. Меняется также поле зрения оптической системы, как показано на рис. 3.

Регулировкой этих двух параметров (q и α) можно настроить СТЗ на оптимальный режим работы в зависимости от условий эксплуатации мобильного робота.

Однако вычислить расстояние до маяков по их проекциям на фотоматрице телекамеры непосредственно по приведенной формуле не удастся вследствие неидеальности оптической системы (например,

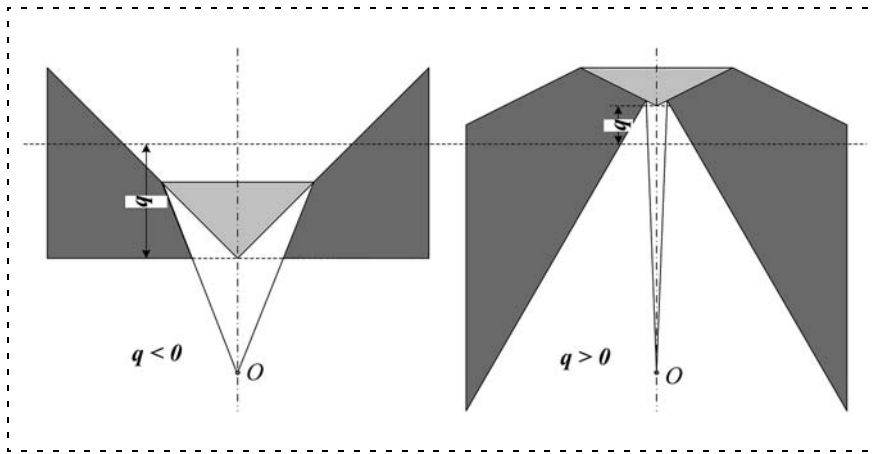


Рис. 3. Поле зрения оптической системы для двух вариантов ее реализации



Рис. 4. Семейство кривых (улитки Паскаля) для $q < 0$ и $q > 0$

ось зеркального конуса не совпадает с оптической осью объектива телекамеры и т. п.). В работе [6] показано, что из-за ошибок в расположении и ориентации зеркального конуса, объектива телекамеры и фотоматрицы окружность радиуса L на плоскости маяков преобразуется на плоскости изображения в улитку Паскаля. На рис. 4 приведен пример семейства кривых (улитки Паскаля) для двух вариантов конструкции оптической системы ($q < 0$ и $q > 0$). Как в первом, так и во втором случаях, начиная с определенного значения L , на кривой в плоскости изображения присутствует

"петля". Видно, что во втором варианте конструкции снижается точность вычисления параметров локализации для ближних маяков, что может привести к ошибкам навигации.

На основе описанных в [8] исследований были получены уравнения для преобразования пространственных координат объекта (относительно робота) в координаты проекции объекта. Показано, что для определения параметров одной улитки Паскаля при фиксированном значении L достаточно выполнить измерение координат проекции маяков на плоскости изображения для двух разных азимутов, а для определения ошибок достаточно знать параметры двух улиток Паскаля. Таким образом, для определения закона преобразования пространственных координат объекта в координаты проекции объекта на плоскости фотоматрицы достаточно сделать всего четыре измерения.

Была разработана методика калибровки СТЗ, которая позволила создать алгоритм преобразования координат изображения маяка в его азимут и дальность относительно робота. Этот алгоритм используется при анализе изображений и выделении объектов.

Обнаружение объектов-маяков по их цифровым изображениям

Особенность рассматриваемой СТЗ состоит в том, что как сами объекты-маяки, так и фон представляются на плоском изображении сильно искаженными (в геометрическом смысле). В результате этих искажений маяк из практически точечного объекта превращается в вытянутое пятно, на изображении проявляются блики от любых источников света, попадающих в поле зрения оптической системы. На рис. 5 приведены примеры такого цифрового изображения для трех последовательных полукадров. Можно заметить, что "след" маяка на изображении меняет свою яркость и размер от кадра к кадру. Это вызвано тем, что маяк мигает с частотой 16 Гц.

Маяки имеют ряд признаков, позволяющих выделить их на изображении. Например, известно, что маяк является источником ИК излучения. Следовательно, часть шумовых ("ложных") объектов можно отфильтровать простым использованием ИК фильтра. На рис. 6 приведены примеры использования фильтра ИК-6 для той же последовательности кадров. Можно видеть, что установка ИК фильтра позволяет отсеять часть "ложных" объектов или, по крайней мере, значительно их ослабить. Однако флуктуационные шумы остаются весьма значительными. Кроме того, часть "ложных" объектов все еще проявляется на изображении, особенно в условиях яркого освещения сцены лампами накаливания.

Фильтрацию шумов и "ложных" объектов назовем предфильтрацией. Наиболее простым и часто используемым методом фильтрации шума является пороговый метод. Такой метод с вычислением пороговой функции, аппроксимирующей фон, был использован в первой версии робота "Кронус" [6]. Опыт показал, что метод нестабилен, обладает низкой точностью и требует больших вычислительных мощностей для организации динамической адаптации к быстро меняющемуся при движении робота изображению.

Для более эффективного решения задачи предфильтрации предлагается использовать межкадровую разность [7]. Используется свойство маяков мигать с частотой 16 Гц. Метод основан на предположении, что объекты, не являющиеся маяками, за короткий промежуток времени между двумя последовательными кадрами не могут изменить мощность своего излучения сильнее, чем это сделает маяк. На рис. 7 приведены примеры разностных изображений между двумя соседними полукадрами (модуль разности).

Из сравнения изображений на рис. 6 и рис. 7 можно видеть, что основная часть "ложных" объектов, образованных бликами и неоднородным фоном, исчезает; остается лишь высокочастотный флуктуационный шум. Теперь можно использовать более простой (по сравнению с [6]) пороговый метод с постоянным значением порога для всего поля изображения. Значение порога мало, и предназначен он только для фильтрации флуктуационного шума.

Фактически, использование межкадровой разности — это некоторый аналог полосового фильтра, настроенного на частоту мигания маяка 16 кГц.

Простое использование порогового метода оказывается не достаточно эффективным — на разностном изображении все еще остается часть "шумовых" элементов. В целях повышения помехоустойчивости алгоритма предлагается использовать метод фильтрации по связности.

Пусть \mathbf{A} есть некоторая матрица размерности $(m \times n)$. Обозначим

$$\text{norm}(x) = \begin{cases} 0, & x = 0; \\ 1, & x \neq 0. \end{cases}$$

Введем операцию Ω над матрицей \mathbf{A} , в результате которой формируется новая матрица \mathbf{B} , в которой каждому элементу матрицы \mathbf{A} сопоставляется число ненулевых элементов в подматрице 3×3 вокруг него:

$$\Omega(\mathbf{A}) = \mathbf{B}, \quad B_{i,j} = \sum \text{norm}(A_{i+\varepsilon, j+\varepsilon}), \quad \varepsilon \in \{-1, 0, 1\},$$

где $A_{i,j}$ и $B_{i,j}$ — (i, j) -й элементы соответственно матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} (для краевых элементов матрицы \mathbf{A} значения элементов матрицы \mathbf{B} присваивается ноль).



Рис. 5. Цифровые изображения маяка (три последовательных полукадра)

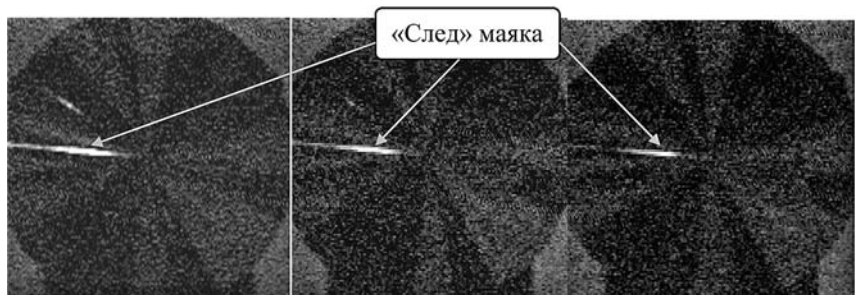


Рис. 6. Примеры использования инфракрасного фильтра ИК-6

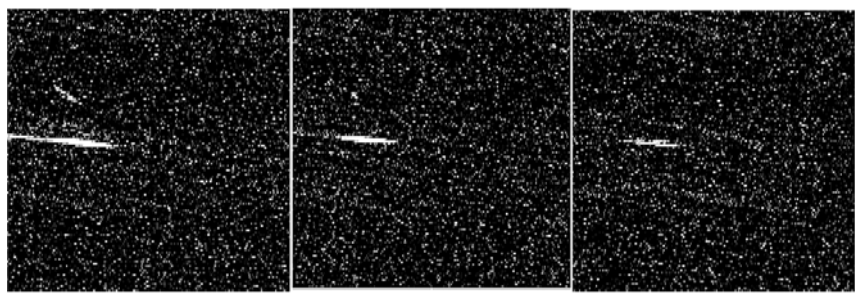


Рис. 7. Модуль межкадровой разности (для наглядности яркость увеличена примерно в два раза по сравнению с рис. 6)

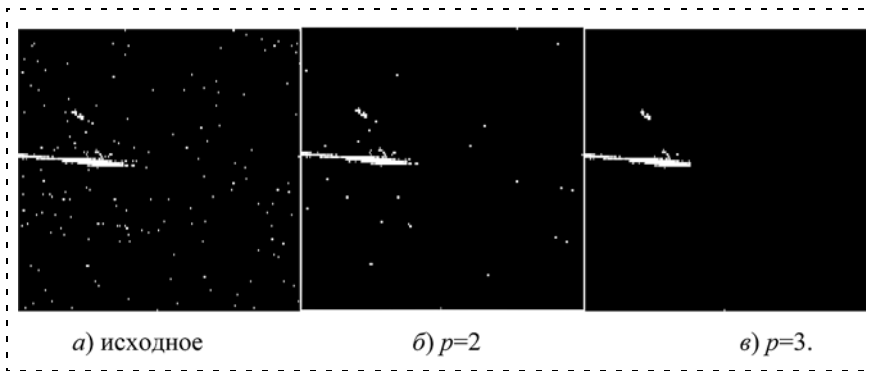


Рис. 8. Фильтрация по связности для различных значений параметра p

Определение. Метод фильтрации по признаку p -связности — это преобразование матрицы изображения \mathbf{A} сначала к матрице \mathbf{B} : $\Omega(\mathbf{A}) = \mathbf{B}$, а затем к матрице \mathbf{C} согласно выражению

$$C_{i,j} = \begin{cases} 0, & B_{i,j} < p; \\ A_{i,j}, & B_{i,j} \geq p. \end{cases}$$

Фильтрация с использованием метода анализа связности проводится в предположении, что объект (маяк) формирует на разностном цифровом изображении достаточно плотное множество точек — это видно из фотографий на рис. 6 и рис. 7. На рис. 8 приведены примеры фильтрации разностного изображения по признаку связности для значений $p = 2$ и $p = 3$. Как показали эксперименты, оптимальное значение параметра $p = 3$.

Теперь можно локализовать на полученном изображении интересующие нас объекты-маяки, т. е. определить их азимуты и дальности до них.

Локализация объектов-маяков по их изображениям

Поскольку образы маяков имеют четко ориентированную структуру, обусловленную наличием в оптической системе зеркального конуса, разбиваем полученную на этапе предфильтрации картинку на секторы с углом в центре цифрового изображения и по сумме значений яркостей пикселей разностного изображения в каждом из секторов определяем наличие там объекта.

В эксперименте изображение было разбито на 256 секторов. Просуммировав значения пикселей разностного изображения полукадра, принадлежащих каждому из секторов, получим массив из 256 чисел, который будем называть разверткой окружности, и локальные максимумы в котором, будем полагать, соответствуют объектам-маякам. На рис. 9, а приведен пример результирующей функции, полученной методом суммирования на окружность для реального изображения.

Угол, образованный лучом, соответствующим направлению движения робота, и лучом, соответствующим направлению на объект-маяк, определяет азимут объекта.

Для определения дальности до объектов-маяков требуется вычислить, на каком расстоянии от центра изображения, совпадающего с оптическим центром, находятся их образы. С этой целью находим проекцию всех точек секторов, которые пересекаются с выделенным на первом этапе объектом, на луч, проходящий через центр изображения и точку на окружности, соответствующую локальному экстремуму. Эта точка получается на этапе суммирования на окружность.

Далее разбиваем луч на маленькие отрезки и считаем сумму значений пикселей разностного изображения, попавших в каждый из отрезков. В результате работы алгоритма суммирования на радиус мы получаем функцию, локальные максимумы которой, как мы полагаем, соответствуют центрам объектов. На рис. 9, б приведен пример результирующей функции, полученной методом суммирования на радиус сектора реального изображения.

Как и в методе суммирования на окружность, суммирование на радиус требует поиска локальных максимумов в массиве. Это — отдельная задача, оптимальный подход к которой в данной статье не рассматривается. В качестве параметра выбиралась точка, соответствующая центру тяжести. Выбор именно центра тяжести, а не точки с максимальным значением, позволяет стабилизировать значение расстояния до объекта в процессе движения робота.

В результате работы пары алгоритмов суммирования с достаточной для решения задач навигации точностью находим все множество видимых объектов и определяем азимут и дальность до каждого из них.

Одна из проблем, возникших при эксплуатации СТЗ для случая использования разностных изображений, состояла в том, что определяемый центр объекта даже на изображении, полученном при неподвижном роботе, был неустойчив. Осцилляции достигали 5...6 пикселей, а на некоторых полукадрах объекты попросту терялись. Причина, по-видимому,

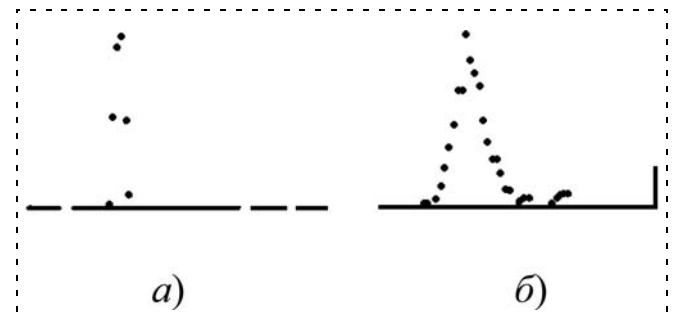


Рис. 9. Пример функции, полученной суммированием на окружность (а) и на радиус (б)

состоит в том, что при вычислении межкадровой разности у объекта часто вычитается центр, а по остающимся пикселям вычисление координат центра объекта сильно затруднено. Эта проблема была решена простым суммированием пары соседних разностных изображений. На картинках, получаемых этим методом, объекты не пропадают, а центр, вычисляемый алгоритмами локализации, достаточно стабилен.

Назначение дополнительной телекамеры

Для решения задачи распознавания бело-черной полосы на черно-белом шахматном поле полигона робот "Кронус" был снабжен дополнительной телекамерой, ориентированной на пол полигона в направлении движения робота (см. рис. 1). Эта полоса имеет сложную траекторию, и задача состояла в организации автономного движения робота по этой траектории от старта до финиша. Изучено и реализовано два подхода к распознаванию образа полосы на растре [7]. Построчная обработка изображения с последующим применением метода наименьших квадратов является быстрым методом, но он недостаточно надежен. Алгоритм, использующий кластерный анализ, более ресурсоемок, но при этом практически нечувствителен к таким помехам, как блики. Пример работы алгоритма распознавания полосы приведен на рис. 10.

Решение задач навигации

В работах [6—7] дано описание алгоритмов решения навигационных задач на основе видеоданных, получаемых с помощью СТЗ кругового обзора, и приведены примеры их успешного решения МР "Кронус" на международных соревнованиях мобильных роботов. Решены следующие элементы автономной навигации МР: движение из произвольной точки полигона на маяк, прохождение ворот, образованных маяками, движение вокруг двух маяков — "восьмерка", прохождение нескольких ворот с последующим выходом на одиночный маяк — "змейка", прохождение по траектории, образованной несколькими маяками — "куча", движение по полосе. В качестве примера можно привести логику постановки трех базовых задач навигации:

1. *Маяки-ворота.* В момент старта включен один маяк. Робот должен подвезти к нему отражающий диск, после чего маяк гаснет и зажигается следующий. Вместо очередного маяка может зажечься сразу пара маяков ("ворота"). Тогда робот должен

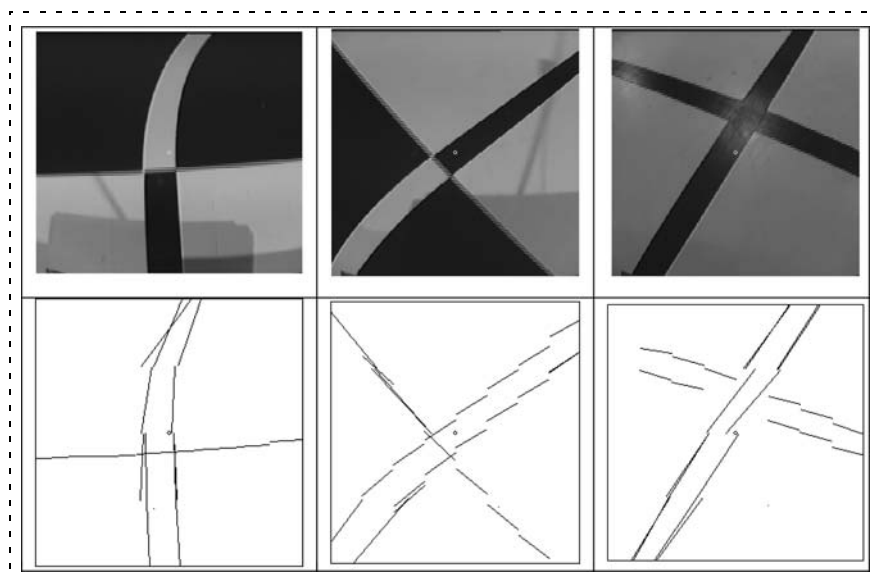


Рис. 10. Пример работы алгоритма распознавания полосы

пересечь линию, их соединяющую. После этого маяки гаснут, и зажигается следующий маяк или пара маяков. Упражнение считается законченным, если на полигоне не зажигается ни один маяк.

2. *Маяки-ворота-восьмерка.* Упражнение по пункту один, но возможна ситуация, когда маяки очередных ворот не гаснут при их пересечении роботом. В таком случае робот должен двигаться по "восьмерке": он должен объехать по кругу первый маяк, снова пройти в ворота в том же направлении, объехать по кругу второй маяк, и так далее, пока маяки не погаснут.

3. *Полоса.* Упражнение по пункту один со следующим дополнением. Если при прохождении очередных ворот их маяки гаснут и вокруг не зажигается ни один новый маяк, то под центром ворот, перпендикулярно им, расположена полоса. Робот должен ее найти и двигаться по ней, пока не зажжется очередной маяк.

Одновременно с достижением основной цели была решена задача создания площадки для проведения практических занятий для студентов старших курсов механико-математического факультета МГУ [9]. Данное направление имеет целью подготовить молодых специалистов к работе в команде и обучить их навыкам разработки сложных систем с использованием современных научно-технических достижений.

Заключение

Эксперименты показали, что на специфических изображениях, полученных с помощью СТЗ с зеркальным конусом, достаточно успешно удается обнаруживать объекты заданного класса и вычислять их пространственные координаты относительно мобильного робота. Использование межкадровой раз-

ности позволяет упростить применение пороговых методов сегментации изображений, а в совокупности с фильтрацией по связности повысить эффективность алгоритмов выделения на изображениях "мигающих" объектов и обеспечить определение их пространственных координат. Приемы суммирования на окружность и на радиус для локализации объектов на изображении определяются специфической геометрией получаемых изображений и в силу своей интегральности обеспечивают устойчивость алгоритмов к геометрическим искажениям формы объектов. Построение математической модели СТЗ с зеркальным конусом позволило выявить параметры оптической системы, оказывающие существенное влияние на точность определения дальности до объектов, и разработать методику вычисления соответствующих корректирующих коэффициентов. Последнее полностью согласуется с концепцией использования математических моделей датчиков для разработки методов предобработки с помощью цифровых спецпроцессоров сигналов датчиков в целях улучшения их технических и эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. **Yagi Y., Kawato S.** Panorama scene analysis with conic projection. IEEE International workshop on intelligent Robots & Systems // Proc. IROS'90. 1990, V. 1. P. 181—187.

2. **Yagi Y., Kawato S. and Tsuji S.** Real-time omnidirectional image sensor (COPIS) for vision-guided navigation // IEEE Trans. On Robotics & Automation 1994. V. 10. P. 11—22.

3. **Pegard C., Mouaddib E. M.** A mobile robot using panoramic view. Robotics and Automation, 1996 // Proc. 1996 IEEE International Conference. V.1. P. 89—94.

4. **Yamazawa K., Yagi Y. and Yachida M.** Obstacle detection with omnidirectional image sensor hyperomni vision. Robotics and Automation, 1995 // Proc. 1995 IEEE International Conference. V. 1. P. 1062—1067.

5. **Yagi Y., Sato K., Yachida M.** Evaluating effectively of map generation by tracking vertical edges in omnidirectional image sequence. Robotics and Automation, 1995 // Proc. 1995 IEEE International Conference. V. 3. P. 2334—2339.

6. **Безоян М. Г., Беляев А. С., Горбушина О. А., Соколова А. А., Андреев В. П., Буданов В. М., Девянин Е. А.** Мобильный робот "КРОНУС". Мобильные роботы и мехатронные системы // Материалы научной школы-конференции (Москва, 5—6 декабря 2000 года). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 68—88.

7. **Андреев В. П., Трушкин Ф. А.** Анализ телевизионных изображений в системе технического зрения робота "Кронус". Мобильные роботы и мехатронные системы // Матер. науч. шк.-конф. (Москва, 3—4 декабря 2001 года). М.: Изд-во Моск. ун-та. 2001. С. 42—53.

8. **Горбушина О. А., Девянин Е. А.** Математическая модель системы технического зрения мобильного робота КРОНУС. Мобильные роботы и мехатронные системы // Матер. науч. шк.-конф. (Москва, 3—4 декабря 2001 года). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. С. 29—41.

9. **Буданов В. М., Андреев В. П., Пронкин В. Ю., Трушкин Ф. А., Козорезов Ю. Ю.** Команда "КРОНУС". Мобильные роботы и мехатронные системы // Матер. науч. шк.-конф. (Москва, 5—6 апреля 2004 года). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 12—14.

ИНФОРМАЦИЯ

3—8 октября 2011 г.
в пос. Дивноморское Геленджикского района состоится
4-я Всероссийская мультиконференция
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2011)

Председатель Президиума мультиконференции — академик РАН В. Г. Пешехонов

Состав мультиконференции

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

Подробная информация о мультиконференции размещается на сайте:

<http://www.mvs.tsure.ru>

П. В. Бабаян, канд. техн. наук, нач. лаб.,
А. Н. Гаврилов, канд. техн. наук, доцент,
 Рязанский государственный
 радиотехнический университет,
 gsrsl@mail.ru

Использование систем технического зрения при автоматизации производства герконов

Рассмотрены подходы к автоматизации операций сборки и затаривания контакт-деталей в производстве герконов с применением систем технического зрения на основе фотодатчиков и с применением видеокамеры. Предлагаемые технические решения обеспечивают надежный оптический контроль и коррекцию положения контакт-деталей. Разработаны модели для исследования эффективности этих подходов. Представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: геркон, технологическая операция, определение положения контакт-детали, система технического зрения, оптоэлектронный контроль, распознавание сигналов фотоприемника, логический анализатор, видеокамера, обработка изображения

Герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы) — хорошо известный вид переключающих устройств — находят широкое применение во многих изделиях радиоэлектронной промышленности, в числе которых средства связи, системы измерения, автоматики, контроля и управления. Различные фирмы-производители герконов и изделий на герконах предлагают множество вариантов их применения, в числе которых: всевозможные датчики охранной сигнализации, автомобильные датчики, датчики перемещения, положения, ударные датчики. С использованием герконов разрабатываются одно- и многопозиционные датчики-сигнализаторы и дискретные преобразователи уровня [1].

Экономические проблемы современности и вопросы конкурентоспособности ставят перед произ-

водителями герконов задачу повышения эффективности производства, решение которой лежит на пути повышения уровня автоматизации производства.

Типовой технологический маршрут производства герконов состоит из ряда операций, в числе которых: подготовка проволоки из магнитомягких сплавов; изготовление контакт-деталей; подготовка контакт-деталей герконов для обжига; подготовка исходных стеклотротов и изготовление стеклобаллонов; нанесение контактных покрытий; сборка — заварка; заключительные операции, испытания.

В настоящее время процесс производства герконов не обходится без использования ручного труда. В частности, подготовка контакт-деталей герконов для обжига предполагает их ручную укладку (затаривание) в специальные контейнеры — стаканчики. Суть этой операции состоит в том, что контакт-детали должны быть уложены в контейнеры одинаково ориентированными, т. е. контактной площадкой (рис. 1) в одну сторону. Выполнение этой технологической операции с требуемой скоростью и качеством требует определенных навыков, причем в ближайшее время просматривается проблема с набором кадров на эту трудоемкую и монотонную операцию.

Известны попытки решить эту проблему с помощью автомата затаривания контакт-деталей с щелевым ориентатором [2]. Принцип действия такого устройства сводится к следующему. В бункер щелевого ориентатора загружаются хаотически ориентированные контакт-детали, выстраивающиеся за счет вибрации в движущийся по спиралеобразному желобу кортеж. В желобе контакт-детали ориентируются плющением вперед или назад случайным образом. Проходя над расположенной на пути их движения щелью, контакт-детали проваливаются в нее, принимая однонаправленную ориентацию за счет смещения своего центра тяжести. Однако предложенное решение не имело ожидаемого результата из-за большого числа ошибок, особенно при работе с малоразмерными контакт-деталими.

Построение автомата затаривания с использованием технического зрения

Более эффективное решение этой проблемы может быть получено с помощью устройства, оснащенного системой технического зрения (СТЗ). В дальнейшем это устройство будем называть автоматом затаривания с использованием технического зрения (АЗТЗ). Предлагаемое устройство может быть построено на основе известного решения [2], в отличие от которого "ответственность" за правильное положение контакт-деталей берет на себя не механический щелевой ориентатор вибробункера, а СТЗ (рис. 2, 3), осуществляющая оптический контроль положения контакт-деталей в процессе затаривания и корректировку их ориентации в случае непра-

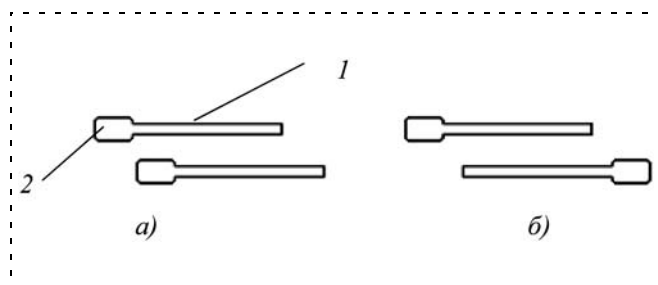


Рис. 1. Ориентация поступающих на затаривание контакт-деталей:

a — ориентированные в одну сторону; *б* — ориентированные в разные стороны (*1* — контакт-деталь, *2* — контактная площадка контакт-детали)

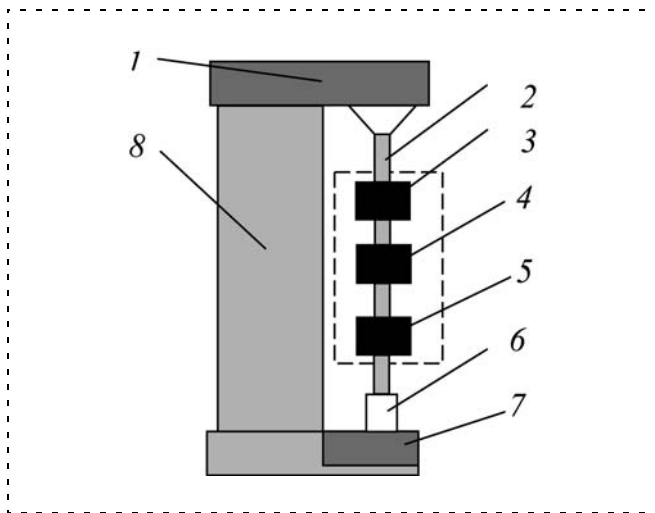


Рис. 2. Упрощенное изображение АЗТЗ:
 1 — вибробункер; 2 — направляющая для подачи контакт-деталей; 3 — СТЗ, предназначенная для оптического контроля ориентации контакт-детали; 4 — исполнительный механизм, разделяющий одно- и разнонаправленные контакт детали; 5 — поворотное устройство; 6 — тара (стаканчик); 7 — карусель для подачи тары; 8 — станина

вильного положения, что обеспечивает более высокую эффективность предлагаемого устройства по сравнению с прототипом [2].

Упрощенное изображение такого АЗТЗ представлено на рис. 2, где узлы 3, 4 и 5 образуют автомат ориентирования контакт-деталей на основе технического зрения (АОТЗ).

Построение автомата ориентирования контакт-деталей с оптоэлектронной системой технического зрения

В рамках представленной на рис. 2 структуры АЗТЗ возможны разные варианты АОТЗ, отличающиеся как построением поворотного устройства, так и видом СТЗ.

На рис. 3 показан вариант построения АОТЗ, в котором используется сравнительно простая СТЗ на основе свето- и фотодиодов.

Как следует из рис. 3, при прохождении контакт-детали между источником света (ИС) и фотоприемником (ФП) изменяется интенсивность светового потока. Характер этого изменения зависит от ориентации контакт-детали и проявляется в форме электрического сигнала на выходе фотоприемника ФП.

По виду сигнала $x(t)$ на выходе ФП устройство обработки (УО) (рис. 4) принимает решение об ориентации контакт-детали $r(t)$ и с помощью исполнительного механизма ИМ выполняет соответствующее перемещение заслонки: если принимается решение о правильном положении контакт-детали, то заслонка переводится в положение "1" и контакт поступает в контейнер, в противном случае заслонка переводится в положение "2" и контакт поступает на поворотное устройство, а затем в контейнер.

Если при пересечении светового потока контакт-деталью плоскость плющения перпендикулярна направлению светового потока, что можно обеспечить соответствующим расположением ведущей от вибробункера направляющей, источника света ИС и фотоприемника ФП, то сигналы на выходе ФП будут иметь вид показанных на рис. 5 двухуровневых импульсов $x(t)$, в которых низкий уровень появляется при прохождении плющенной части контакт-детали, а высокий — остальной ее части.

Достаточно простым техническим решением устройства обработки (УО) является двухпороговый логический анализатор, позволяющий по виду импульсов с ФП принимать решение об ориентации контакт-детали. Представленная на рис. 4 функциональная схема такого устройства состоит из компараторов $C1$, $C2$, элемента задержки τ и D -триггера T .

Компаратор $C1$ срабатывает, если сигнал $x(t)$ на его входе меньше уровня $X1$, а компаратор $C2$ — если сигнал $x(t)$ меньше уровня $X2$. Работу этого устройства иллюстрируют представленные на рис. 4 временные диаграммы, полученные в результате моделирования устройства в среде визуального мо-

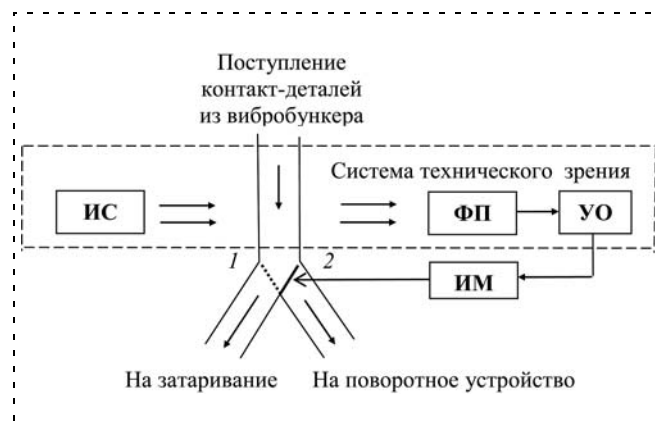


Рис. 3. Структурная схема АОТЗ со светодiodным контролем и коррекцией положения контакт-деталей при автоматическом затаривании: ИС — источник света; ФП — фотоприемник; УО — устройство обработки сигнала ФП; ИМ — исполнительный механизм; 1, 2 — положения заслонки

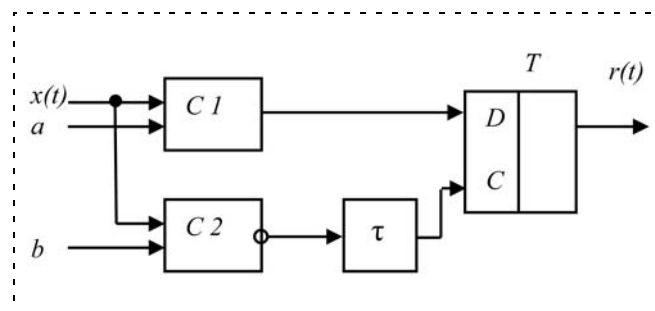


Рис. 4. Функциональная схема УО в АОТЗ со светодiodным контролем: $C1$, $C2$ — компараторы; T — D -триггер; τ — элемент задержки; $x(t)$ — сигнал фотоприемника ФП; $r(t)$ — сигнал решения о положении контакт-детали

делирования *Simulink* системы *MATLAB*. Как следует из этих диаграмм, в случае импульсов, соответствующих контакт-деталю, ориентированном плущением вперед, триггер *D* остается в нулевом состоянии или возвращается в это состояние. Импульсы, соответствующие контакт-деталю, ориентированном плущением назад, переводят триггер *T* в единичное состояние. Сигнал с выхода этого триггера поступает на ИМ, в качестве которого может быть использован электромагнит, который, изменяя положение за-слонки (см. рис. 3), управляет процессом поступления контакт-деталей на зата-ривание, направляя их на поворотное устройство или сразу в контейнер.

Особенности построения оптоэлектронной системы технического зрения, ориентированной на работу в условиях помех

Реальные сигналы ФП могут быть искажены помехой, что может быть причиной недопустимого числа ошибок при определении положения контакт-детали с помощью светододиодного АОТЗ. В этом случае задача определения положения контакт-детали сводится к задаче распознавания формируемых на выходе ФП сигналов и может быть решена путем цифровой корреляционной обработки сигналов ФП следующим образом.

Пусть в отсутствие искажающих факторов сигналы ФП $x_1(t)$, $x_2(t)$, соответствующие правильному обратному положению контакт-детали (рис. 5), могут быть представлены дискретными отсчетами $x_1[n]$, $n = \overline{1, N}$, и $x_2[n]$, $n = \overline{1, N}$, на интервале $T = N\Delta t$, где T — длительность импульса, а Δt — интервал дискретизации, принимаемый в дальнейшем равным единице. С учетом искажений наблюдаемый на выходе ФП сигнал можно представить в виде [3]

$$z[n] = \lambda_1(\lambda_2 x_1[n] + (1 - \lambda_2)x_2[n]) + \xi[n], \quad (1)$$

где $\xi[n]$ — случайная помеха; λ_1, λ_2 — случайные величины, принимающие значения 0 или 1: $\lambda_1 = 1$ соответствует наличию контакт-детали, $\lambda_2 = 1$ соответствует правильному положению контакт-детали, $\lambda_2 = 0$ — обратному.

Решение задачи распознавания сигналов $x_1[n]$, $n = \overline{1, N}$, $x_2[n]$, $n = \overline{1, N}$, по сигналу (1) может быть получено путем вычисления скалярных произведений $S_1[n]$, $S_2[n]$ вектора отсчетов $\mathbf{z}^T = \{z[n - N + i], i = \overline{1, N}\}$, наблюдаемого на интервале $T = N\Delta t$,

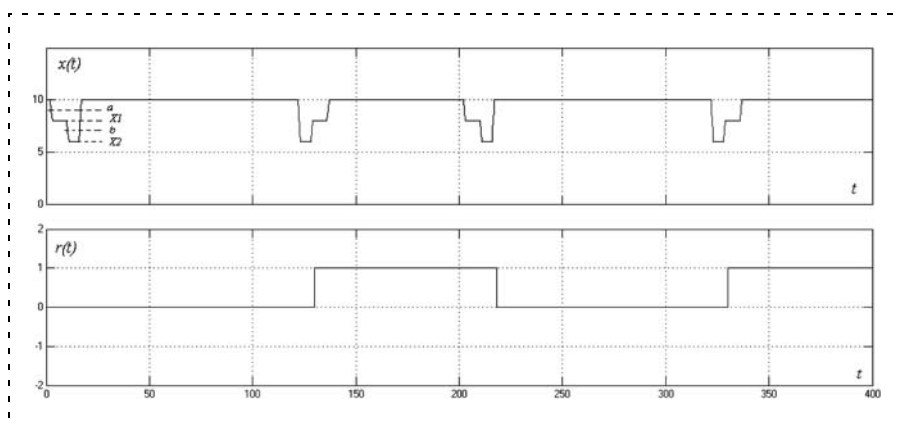


Рис. 5. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу УО в АОТЗ со светододиодным контролем: $x(t)$ — сигнал на выходе ФП; $r(t)$ — сигнал на выходе УО

с векторами отсчетов опорных сигналов $\mathbf{x}_1^T = \{x_1^0[n - N + i], i = \overline{1, N}\} = \{x_1[n - N + i], i = \overline{1, N}\}$ и $\mathbf{x}_2^T = \{x_2^0[n - N + i], i = \overline{1, N}\} = \{x_2[n - N + i], i = \overline{1, N}\}$ [3]:

$$S_1[n] = \mathbf{z}^T \mathbf{x}_1 = \sum_{i=1}^N z[n - N + i] x_{10}[n - N + i]; \quad (2)$$

$$S_2[n] = \mathbf{z}^T \mathbf{x}_2 = \sum_{i=1}^N z[n - N + i] x_{20}[n - N + i].$$

Величины $S_1[n]$, $S_2[n]$ должны вычисляться в скользящем окне длительностью $T = N\Delta t$, т. е. в каждый дискретный момент времени n . При достижении одной из этих величин максимума определяется разность $\Delta S[n] = S_1[n] - S_2[n]$, по знаку которой и принимается решение

$$\gamma = \begin{cases} x_1(t), & \text{если } \Delta S[n] \geq 0; \\ x_2(t), & \text{если } \Delta S[n] < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку величины $S_1[n]$, $S_2[n]$ нарастают с увеличением попадающей в окно части полезного сигнала, достигают максимума при полном перекрытии полезного сигнала окном и начинают убывать по мере того, как степень перекрытия уменьшается, то вычисление разности $\Delta S[n]$ следует проводить в момент смены знака скорости $V[n]$ нарастания контролируемого скалярного произведения:

$$V[n] = S_j[n] - S_j[n - 1]. \quad (4)$$

Таким образом, алгоритм обработки по распознаванию сигналов $x_1[n]$ и $x_2[n]$ сводится к следующему.

1. В скользящем окне вычисляются скалярные произведения (2).
2. Определяется скорость (4) изменения одного из них.

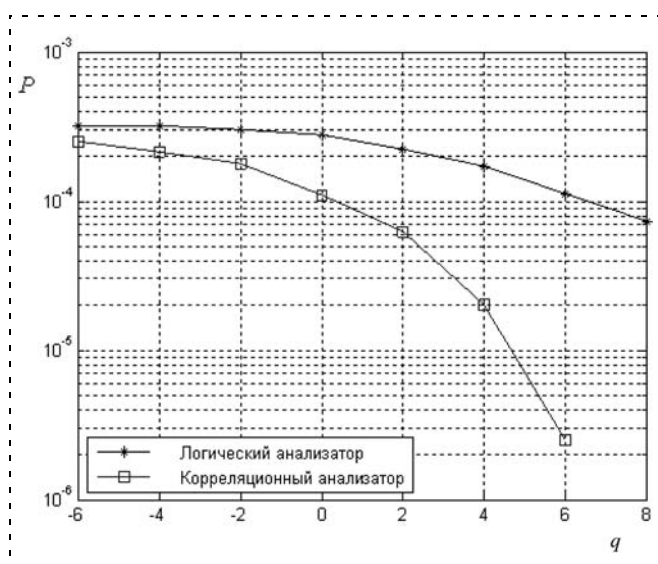


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибочного решения P от отношения сигнал/шум $q = (x_1 - x_2) / \sqrt{D}$, где D — дисперсия помехи типа гауссовский белый шум с нулевым средним

3. В момент изменения знака скорости, определяемой в п. 2, находится разность скалярных произведений, вычисляемых по формулам (2).

4. Принимается решение по правилу (3).

Для исследования эффективности предлагаемого алгоритма (3)—(4) обработки сигналов ФП и двухуровневого логического анализатора было проведено статистическое моделирование, результаты которого представлены на рис. 6.

Как следует из рис. 6, алгоритм цифровой корреляционной обработки снижает вероятность ошибки P по сравнению с логическим анализатором. Для вероятности $P = 10^{-4}$ выигрыш составляет примерно 6 дБ. Ценой этого эффекта является некоторое усложнение СТЗ по сравнению с рассмотренным двухпороговым логическим анализатором. Однако вопрос реализации этого алгоритма без особых затруднений может быть решен с помощью сигнального процессора или ПЛИС.

Особенности построения СТЗ на основе видеокамеры

Особого внимания заслуживает вариант построения СТЗ автомата ориентирования контакт-деталей на основе видеокамеры. Структурная схема АОТЗ с видеоконтролем и коррекцией положения контакт-деталей при автоматическом затаривании аналогична представленной на рис. 3. Отличие состоит в том, что вместо фотоприемника ФП используется видеокамера ВК, а в качестве устройства обработки УО — персональный компьютер ПК.

Привлекательность такой реализации состоит в ее универсальности. Применение ПК для видеобработки сигнала с видеокамеры позволяет применять разнообразные алгоритмы, учитывающие все-

возможные особенности получаемого с видеокамеры изображения.

В разработанном варианте АОТЗ анализируемая область изображения имеет размеры 550×40 элементов разрешения, что позволяет обнаруживать и определять ориентацию контакт-деталей, перемещающихся в желобе шириной 10 мм и длиной 135 мм.

Алгоритм обработки одного кадра видеопоследовательности, разработанный в предположении, что площадь изображения контакт-детали составляет около 20 % площади изображения и в поле зрения может наблюдаться лишь одна контакт-деталь, включает следующие этапы.

1. *Пороговая обработка наблюдаемого изображения.*

Порог выбирается экспериментально и зависит от параметров ИС и ВК. Ориентировочное значение — 20 % от максимальной яркости изображения.

2. *Проверка условия обнаружения контакт-детали.*

Если в результате пороговой обработки выделено менее 1 % или более 30 % от общей площади изображения, принимается решение об отсутствии контакт-детали в поле зрения, и начинается обработка следующего кадра с п. 1.

3. *Разметка и параметризация.* Составление таблицы связанных областей бинарного изображения (сегментов), содержащей параметры прямоугольников, описанных вокруг прямоугольных областей. Для повышения быстродействия целесообразно использовать вычислительно эффективный алгоритм разметки и параметризации.

4. *Выбор сегмента наибольшей площади.*

5. *Проверка условий обнаружения контакт-детали.*

Если площадь выбранного сегмента составляет менее 10 % от общей площади изображения или он касается края изображения, то выполняется переход к обработке очередного кадра с п. 1.

6. *Построение тестовых прямоугольников R_1 и R_2* на концах сегмента (рис. 7) и определение числа точек бинарного изображения, попавших в тестовые прямоугольники. Площади тестовых прямоугольников составляют 20 % от площади прямоугольника, описанного вокруг объекта.

7. *Принятие решения.* Если в тестовый прямоугольник R_1 попало больше точек, чем в R_2 то контакт-деталь ориентирована контактной площадкой влево, иначе контакт-деталь ориентирована контактной площадкой вправо.

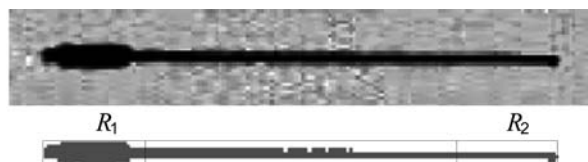


Рис. 7. Наблюдаемое изображение контакт-детали (вверху) и результат пороговой обработки (внизу). Черными линиями оговорен сегмент, соответствующий контакт-детали; R_1 , и R_2 — тестовые прямоугольники

Основные технические параметры АОТЗ с видео-контролем и коррекцией положения контакт-деталей при автоматическом затаривании представлены ниже.

Длина контакт-детали, мм	7...40
Ширина контакт-детали, мм	0,5...3
Размеры (без компьютера), не более, мм	1500 × 400 × 400
Производительность, число контакт- деталей в секунду	4
Вероятность ошибки	$\leq 10^{-3}$
Питание, В; Гц	220; 50
Потребляемая мощность, Вт	≤ 150

Использование СТЗ при сборке герконов

Другой проблемой, возникающей при автоматизации процесса изготовления герконов, является снижение процента брака на сборочной операции. По используемой в настоящее время технологии сборки контакт-детали подаются из вибробункера в колбу геркона по направляющим, позиционируются и свариваются в нее. При этом ориентация поступающих на сборку контакт-деталей может быть правильной, т. е. контактной площадкой вперед, и неправильной, т. е. контактной площадкой назад (рис. 8). Во втором случае получается бракованное изделие.

Для снижения процента бракованных изделий необходимо контролировать ориентацию контакт-детали при ее движении к колбе геркона в целях выявления и коррекции положения контакт-детали. В случае правильной ориентации контакт-деталь должна поступать на сборку, в противном случае — на поворотное устройство и затем на сборку. Эта задача, подобно задаче затаривания контакт-

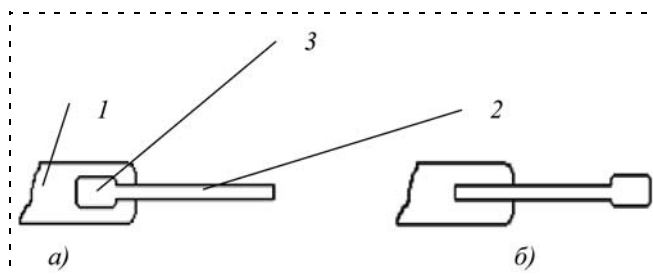


Рис. 8. Ориентация поступающей на сборку контакт-детали: а — правильная; б — неправильная (1 — стеклоballон геркона; 2 — контакт-деталь; 3 — контактная площадка контакт-детали)

деталей, может быть решена с помощью рассмотренных СТЗ.

Результаты экспериментального исследования опытных образцов АОТЗ, созданных на основе оптоэлектронных устройств и с использованием видеоконтроля, позволяют считать, что предлагаемые устройства принимают решения практически без ошибок, а применение этих устройств при изготовлении герконов дает возможность существенно снизить процент брака и увеличить объем производства.

Исследования выполнены при поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ НШ-1.2010.10.

Список литературы

1. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе // Сб. тр. первой науч.-практ. конф. / Под ред. д. т. н. С. М. Карабанова. Рязань: Поверенный, 2006, 170 с.
2. Бабаян П. В., Баскаков И. А., Брянцев А. А., Гаврилов А. Н. Применение систем технического зрения в производстве герконов. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе // Тез. докл. 2-й Междунар. научно-технич. конференции / Под ред. д. т. н. С. М. Карабанова. Рязань: Поверенный, 2008. С. 13—17.
3. Акимов П. С., Сенин А. И., Соленов В. И. Сигналы и их обработка в информационных системах. М.: Радио и связь, 1994. 256 с.

ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011) состоится научно-техническая конференция

"Мехатроника и эргатические системы" (МЭС-2011).

Научные направления конференции:

- ♦ АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ
Руководители: член-корр. РАН Е. Д. Теряев, д. т. н., проф. Н. Б. Филимонов
- ♦ АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Руководители: член-корр. РАН Г. Г. Себряков, д. пс. н., проф. С. Ф. Сергеев
- ♦ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Руководители: д. т. н., проф. Ю. В. Подураев, д. т. н., проф. А. С. Ющенко
- ♦ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
Руководители: член-корр. РАН А. Ф. Резчиков, д. т. н., проф. В. Ф. Коростелев

Подробная информация о мультikonференции МКПУ-2011 размещается на сайте: <http://www.mvs.tsure.ru>

УДК 523.4:531.7:534.6

Ж. Ш. Шаршеналиев, академик НАН КР,

И. В. Брякин, канд. техн. наук, зав. лаб.,

Институт автоматизации и информационных технологий

НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек,

bivas2006@yandex.ru

Инерциальные датчики с электромагнитным позиционированием

Для решения задач виброметрии предлагаются новые принципы построения инерциальных датчиков, основанные на использовании свойств магнитомодуляционных преобразователей с электромагнитным позиционированием. Представлены варианты оригинальных конструкций таких датчиков и рассмотрены особенности режимов их функционирования.

Ключевые слова: вибродиагностика, инерциальный датчик, инертная масса, индукционный зонд, упругий подвес, феррозонд, чувствительный элемент

Введение

Одной из острейших проблем в сфере технического контроля и диагностики является получение достоверной экспериментальной информации о кинематических величинах, характеризующих механические колебательные процессы, происходящие в механизмах и сооружениях. Разрушающее действие таких вибраций может быть очень сильным: повышение изнашивания осей, валов, подшипников и возникновение усталости металлов могут привести к поломке деталей машин, образованию трещин в фундаментах, стенах, резервуарах, обрывам тросов и пр.

В свою очередь, любая установка сложных механических систем (например, турбогенератор) является чрезвычайно дорогой инвестицией. Поэтому особенно важным является правильное управление оборудованием и его защита в течение всего срока эксплуатации.

Техническая диагностика в последнее время приобретает особую актуальность в связи с достижением предельных значений ресурсных параметров машин и оборудования.

Для оценки технического состояния значительного числа промышленных объектов и оборудования успешно применяется вибродиагностика. Эффективность диагностики в значительной степени определяется качеством первичной информации, определяемой как конструкцией первичных преобразователей, так и режимом их работы. Это определяет актуальность исследований, направленных

на совершенствование вибропреобразователей в направлении улучшения их характеристик и параметров, изыскание новых принципов измерения, повышение достоверности получаемых результатов измерения, повышение надежности в эксплуатации и удобства пользования, улучшение калибровки аппаратуры, автоматизацию процессов измерения и анализа [1].

Для эффективного решения указанных задач вибродиагностики предлагается использовать новый класс инерциальных датчиков (ИД), основанный на свойствах магнитомодуляционных преобразователей с магнитным позиционированием. Исходя из того, что общим свойством датчиков данного класса является режим градиентометрического функционирования, сформулируем основные принципы их построения: ориентация по естественным или искусственным магнитным аномалиям; использование вторичного ориентационного электромагнитного возмущения и ориентационного зондирования.

Реализация перечисленной последовательности принципов построения представлена в виде конкретных конструктивных решений, суть которых излагается ниже в соответствующих разделах.

Инерциальный датчик с упругим подвесом

В качестве базового функционального элемента ИД, реализующего принцип ориентации по естественным или искусственным магнитным аномалиям, предлагается использовать феррозонд (ФЗ), являющийся магнитомодуляционным преобразователем (рис. 1).

ФЗ состоит из двух цилиндрических ферритовых стержней (полуэлементов 1 и 2); кольцевого ферритового модулятора 5 с двумя электродами из фольгированного стеклотекстолита в виде разрезных

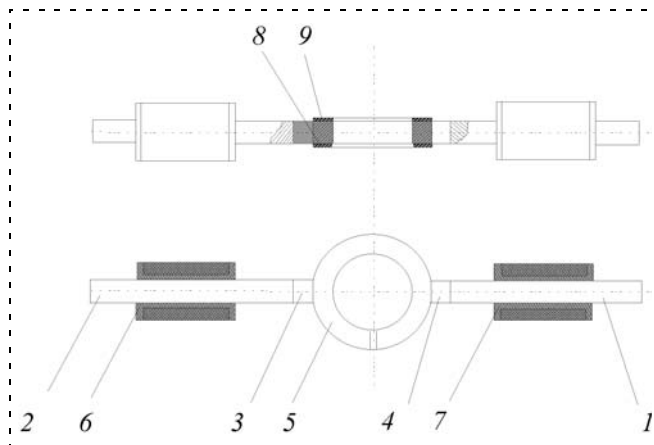


Рис. 1. Базовый функциональный элемент ИД

колец 8 и 9; двух цилиндрических магнитов 3 и 4, обеспечивающих режим постоянного подмагничивания полуэлементов 1 и 2; приемных катушек 6 и 7.

Принцип и особенности основных режимов функционирования ФЗ, имеющего указанные конструктивные особенности, подробно рассмотрены в [2].

Специфика конструкции подобного модулятора обеспечивает данному варианту ФЗ исключительно режим градиентометра, обладающего внутренним свойством компенсации фоновых автокоррелированных магнитных полей. Такой преобразователь обладает высокой чувствительностью к локальным неоднородностям естественного геомагнитного поля и существенной ориентационной инвариантностью к однородным фоновым магнитным полям.

Используя данное свойство рассматриваемого ФЗ, расположим его в качестве инертной массы на упругом подвесе, ориентируя соответствующим образом в рабочем пространстве исследуемого объекта, являющемся еще и геофизической средой (рис. 2).

Рассматриваемый вариант ИД состоит из трех функциональных элементов: ФЗ, образованного совокупностью ферритовых стержневых полуэлементов 1 и 2, кольцевым ферритовым модулятором 3, цилиндрическими магнитами 4 и 5, приемными катушками 6 и 7; *базирующего основания* 8, закрепленного в рабочем пространстве исследуемого объекта 10 с локальной неоднородностью 11; *упругого подвеса* 9.

Настройка рабочего режима такого ФЗ заключается в сведении его выходного сигнала к нулевому значению, что, в свою очередь, обеспечивает необходимую адаптацию ФЗ к распределению неоднородностей магнитного поля в конкретном месте рабочего пространства исследуемого объекта.

При возникновении вибрационных возмущений возбуждаются осциллирующие пространственные перемещения ФЗ (инерционный элемент) на упругом подвесе 9 относительно основания 8.

Если принять, что $H_D(t)$ изменяется по некоторому закону $s(t)$ относительно некоторого среднего уровня H_D^* , то на выходе ФЗ появится ЭДС:

$$e_1(t) = 12\omega bswH_0H_m[H_D^* + as(t)]\cos\omega t = kH_D^*[1 + as(t)/H_D^*]\cos\omega t, \quad (1)$$

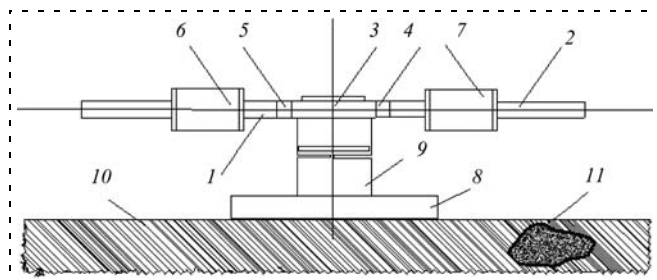


Рис. 2. Инерционный датчик с упругим подвесом

где $k = 12\omega bswH_0H_m$ — коэффициент преобразования ФЗ; a — постоянный во времени коэффициент, выбранный таким образом, чтобы амплитуда колебаний всегда была положительной; ω — круговая частота возбуждающего переменного поля; b — коэффициент аппроксимации, характеризующий магнитные свойства сердечников; s — площадь поперечного сечения одного сердечника; w — число витков измерительной обмотки; H_0 — напряженность постоянного (не измеряемого) подмагничивающего поля; H_m — амплитуда напряженности возбуждающего переменного поля; H_D^* — средний уровень напряженности постоянного измеряемого поля в месте расположения приемных катушек..

В простейшем случае $s(t)$ можно принять в качестве гармонического колебания с частотой $\Omega \ll \omega$ и начальной фазой φ : $s(t) = S\cos(\Omega t + \varphi)$, которое является модулирующим колебанием.

Тогда (1) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} e_1(t) &= kH_D^*[1 + as(t)]\cos\omega t = \\ &= kH_D^*[1 + aS\cos(\Omega t + \varphi)/H_D^*]\cos\omega t = \\ &= kH_D^*[1 + M\cos(\Omega t + \varphi)/H_D^*]\cos\omega t, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M = aS/H_D^* = \Delta H_{D\max}/H_D^*$ — коэффициент модуляции; S , Ω , φ — соответственно амплитуда, круговая частота и начальная фаза осцилляций магнитного поля, связанных с вибрационными возмущениями.

Высокочастотное колебание $H_D^*\cos\omega t$, возникающее при $M = 0$, т. е. при $s(t) \equiv 0$, является несущим.

Если модулирующее колебание содержит ряд гармонических составляющих и представляется рядом

$$s(t) = \sum_{k=1}^N S_k\cos(\Omega_k t + \varphi_k), \quad (3)$$

то из (2) и (3) получаем модулированное колебание вида

$$\begin{aligned} e_1(t) &= KH_D^* \left[1 + a \sum_{k=1}^N S_k\cos(\Omega_k t + \varphi_k) \right] \cos\omega t = \\ &= KH_D^* \left[1 + \sum_{k=1}^N M_k\cos(\Omega_k t + \varphi_k) \right] \cos\omega t, \end{aligned} \quad (4)$$

где $M_k = aS_k/H_D^*$ — парциальные коэффициенты модуляции, характеризующие влияние составляющих модулирующего колебания с частотами $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$ на общее изменение амплитуды модулированного колебания.

Колебание, представленное выражением (3), является сложномодулированным, которое можно представить в виде суммы гармонических колебаний.

Для этого выражение (4) преобразуем к виду

$$e_1(t) = KH_D^* \cos \omega t + K \sum_{k=1}^N \frac{M_k H_D^*}{2} \cos[(\omega + \Omega_k)t + \varphi_k] + K \sum_{k=1}^N \frac{M_k H_D^*}{2} \cos[(\omega - \Omega_k)t - \varphi_k]. \quad (5)$$

Первое слагаемое выражения (5) является несущим колебанием. Вторая группа гармонических составляющих с частотами $(\omega + \Omega_k)$ — верхняя боковая полоса частот. Третья группа гармонических составляющих $(\omega - \Omega_k)$ — нижняя боковая полоса частот.

Таким образом, при осцилляции ФЗ на его выходе появляется разностная ЭДС, величина и спектральный состав которой связаны с параметрами и направлением вибраций, воздействующих на ИД.

Исходя из проведенного анализа физических процессов рассмотренный вариант ИД, основанный на принципе ориентации по естественным фоновым магнитным аномалиям, аналогичным образом можно использовать и для построения варианта системы регистрации сдвиговых деформаций, основанной на изменении ориентации ФЗ относительно искусственных локальных источников магнитных полей (магнитных диполей).

Данную систему регистрации сдвиговых деформаций в случае необходимости вполне возможно использовать и для решения целого ряда задач инженерной геофизики.

Инерциальный датчик с торсионным маятником

Рассмотрим вариант ИД в виде ФЗ с навесными кольцевыми торсионными маятниками, реализующий принцип вторичного ориентационного электромагнитного возмущения (рис. 3) [3].

В его структуру в качестве инерционных масс введены два кольцевых чувствительных элемента (ЧЭ) 1 и 2 с механическим упругим подвесом 3. Они как динамически сбалансированные колебательные системы с сосредоточенными параметрами имеют преимущества перед другими типами ЧЭ, поскольку нечувствительны к компонентам угловых

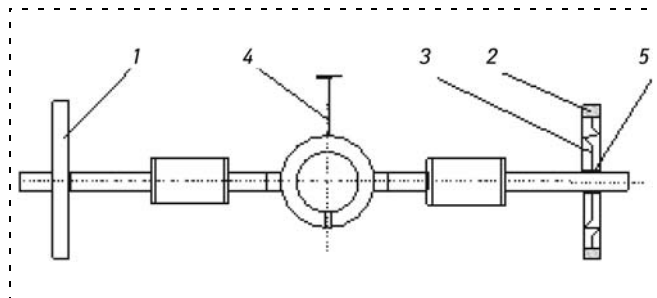


Рис. 3. Инерциальный датчик с кольцевыми торсионными маятниками

ускорений, перпендикулярным к оси вращения. Инерционные элементы 1 и 2 связаны посредством упругих элементов 3 с ферритовым стержнем через переходную диэлектрическую втулку 5. В качестве упругих элементов применены балочки равных сечений и сопротивлений.

Общая жесткость упругих элементов кольцевого ЧЭ вычисляется по формуле

$$K = 4mEJ_c/l^3,$$

где J_c — момент инерции сечения упругого элемента; E — модуль упругости; l — длина упругого элемента; m — число упругих элементов.

Частота собственных колебаний кольцевых чувствительных элементов определяется выражением

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{M/J} = (1/2\pi) \sqrt{K\varphi/J},$$

где φ — угол поворота кольца; J — момент инерции кольца; M — удельный устанавливающий момент.

Таким образом, изменять собственную частоту можно путем изменения размеров ЧЭ и свойств упругих элементов.

Чувствительность кольцевых ЧЭ, как и любых других, определяется выражением вида

$$S = K/(4\pi^2 f_0^2 J).$$

Относительное изменение чувствительности связано с относительными изменениями жесткости, момента инерции и собственной частоты следующим образом:

$$\Delta S/S = \Delta K/K - \Delta J/J - 2\Delta f/f.$$

Динамическая погрешность ЧЭ измерителей угловых ускорений определяется выражением

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(1-n^2)^2 + (2\beta n)^2}} - 1,$$

где $n = f/f_0$ — относительная частота; β — коэффициент демпфирования.

Практически все наиболее важные технические характеристики ИД (чувствительность, быстродействие и частотная характеристика) зависят от параметров ЧЭ и качества его системы подвеса.

Анализ режимов работы такого ИД показал, что целесообразнее использовать кольцевой ЧЭ со струнным подвесом (рис. 4).

ЧЭ представляет собой крутильный маятник в виде электропроводящего замкнутого кольца 1, закрепленного на вольфрамовых струнных подвесах 2 и 3 относительно центрального опорного диэлектрического кольца 4, которое, в свою очередь, располагается на ферритовом стержне ФЗ.

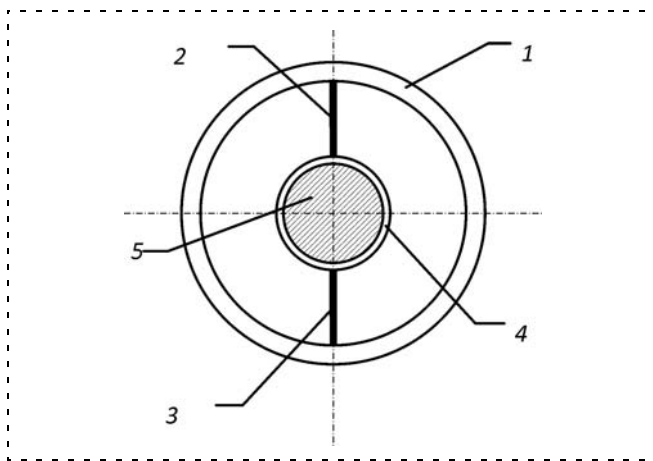


Рис. 4. Кольцевой ЧЭ с упругими элементами струнного типа

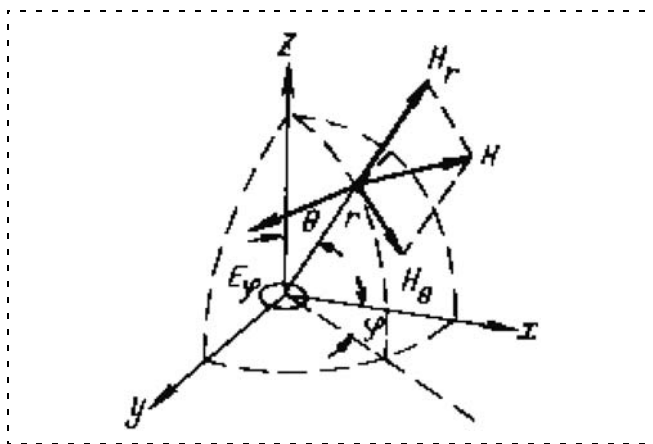


Рис. 5. Поле магнитного диполя в безграничном пространстве

В исходном состоянии ИД с кольцевыми ЧЭ настраивается по нулевому значению выходного сигнала. Поскольку ЧЭ образуют замкнутые витки из токопроводящего материала, то ими создаются соответствующие магнитные моменты, подобные моментам генераторных рамок. В этом случае магнитное поле постоянного диполя в среде с магнитной проницаемостью μ в сферической системе координат r, φ, θ (рис. 5) определяется в соответствии с законом Био-Савара выражением

$$\mathbf{H} = H_\varphi = \frac{1}{\mu} \times \frac{Idz}{4\pi} \times \frac{\sin(r, z)}{r^2}.$$

Вектор-потенциал магнитного типа поля магнитного диполя, помещенного в начало сферической системы координат с осью z , совпадающей с осью диполя, для однородной среды определяется через магнитный момент P выражением

$$A = A_z = P \frac{e^{ikr}}{r}.$$

В силу особенностей пространственного положения ЧЭ и определенных свойств ФЗ осуществляется взаимная компенсация этих магнитных моментов.

Для магнитного диполя, представляющего собой виток бесконечно малого диаметра, обтекаемый переменным током, магнитный момент перпендикулярен к плоскости витка и равен

$$P = Is/4\pi,$$

где I — сила тока, обтекающая виток; s — площадь витка.

Для компонент электромагнитного поля магнитного диполя можем записать:

$$\left. \begin{aligned} E_\varphi &= -P \frac{ikr-1}{r^2} e^{ikr}; E_r = 0; E_\theta = 0; \\ H_\theta &= -P \frac{\sin\theta}{r^3} (1 - ikr - k^2 r^2) e^{ikr}; \\ H_r &= -2P \frac{\cos\theta}{r^3} (1 - ikr) e^{ikr}; H_\varphi = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Силовые линии электрического поля магнитного диполя представляют собой окружности, располагающиеся в плоскостях, перпендикулярных к оси диполя. Силовые линии магнитного поля расположены в меридиональных плоскостях (рис. 5).

С учетом того, что все волновые электромагнитные процессы реализуются в ближней зоне, систему уравнений (6) можем трансформировать к виду

$$H_\theta = -P \frac{\sin\theta}{r^3}; H_r = 2P \frac{\cos\theta}{r^2}; E_\varphi = -P \frac{i\omega\mu}{r^2} \sin\theta. \quad (7)$$

В этом случае магнитное поле совпадает по мгновенным значениям с полем постоянного магнитного диполя, а электрическое поле пропорционально его частоте и сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно тока в диполе. В дальней зоне электрическое поле имеет только компоненты E_φ и H_θ , убывающие пропорционально первой степени расстояния до диполя.

При возникновении вибрационных возмущений происходит отклонение ЧЭ из положения равновесия на небольшой угол в горизонтальной плоскости и наблюдается соответствующая реакция струнных подвесов в виде момента упругих сил. Этот момент пропорционален углу закручивания струны и стремится уменьшить угол закручивания:

$$M = -k\alpha, \quad (8)$$

где k — коэффициент кручения, равный моменту силы, необходимому для закручивания струны на угол, равный одному радиану.

Кроме того, на маятник будет действовать момент силы сопротивления, который будет пропорционален угловой скорости: $M_c = -r\omega$.

Учитывая, что угловая скорость равна первой производной угла закручивания нити, момент силы сопротивления равен

$$M_c = -r(d\alpha/dt) = -r\alpha'. \quad (9)$$

Исходя из (8), (9) и согласно основному закону динамики вращательного движения результирующий момент сил будет равен произведению момента инерции крутильного маятника:

$$-k\alpha - r\alpha' = J\varepsilon. \quad (10)$$

С учетом (11) и того, что угловое ускорение есть вторая производная по углу закручивания струны, т. е. $\varepsilon = (d^2\alpha/dt^2) = \alpha''$, можем записать

$$-k\alpha - r\alpha' = J\alpha'' \text{ или } \alpha'' + (r/J)\alpha' + (k/J)\alpha = 0. \quad (11)$$

Обозначив в (11) $(r/J) = 2\beta$ и $(k/J) = \omega_0^2$, получим выражение вида

$$\alpha'' + 2\beta\alpha' + \omega_0^2\alpha = 0,$$

которое является однородным уравнением второго порядка, имеющим решение

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (12)$$

где α_0 — амплитуда колебаний маятника из положения равновесия; β — коэффициент затухания колебания; $(\omega t + \varphi)$ — фаза колебаний; φ — начальная фаза колебаний; $\omega = 2\pi/T$ — круговая частота.

Пусть отношение двух амплитуд $\alpha(t)$, $\alpha(t+T)$, отличающихся на период T (декремент затухания), равно $\Delta = \alpha(t)/\alpha(t+T)$, а $\lambda = \ln(\alpha(t)/\alpha(t+T)) = \ln(\alpha_0 e^{-\beta t}/\alpha_0 e^{-\beta(t+T)}) = \beta T$, то выражение (12) можно привести к виду

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\lambda \frac{t}{T}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right). \quad (13)$$

Ввиду того, что в рассматриваемом случае α фактически определяет θ , выражение (7) трансформируется к виду

$$H_\theta = -P \frac{\sin\alpha}{r^3}; H_r = 2P \frac{\cos\alpha}{r^2}; E_\varphi = -P \frac{i\omega\mu}{r^2} \sin\alpha. \quad (14)$$

Из анализа (13) и (14) следует, что под воздействием вибрационных возмущений возникают осцилляционные процессы ЧЭ, которые приводят к изменениям направлений векторов соответствующих магнитных моментов на угол α по отношению

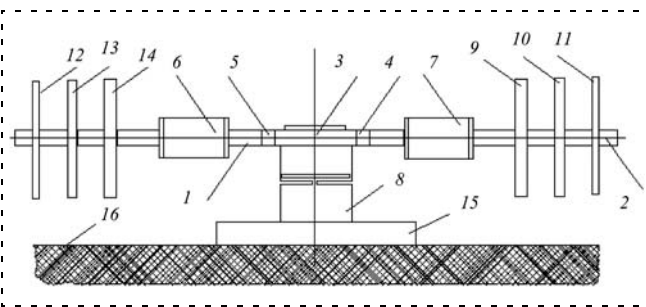


Рис. 6. Частотно-избирательная система:

1, 2 — ферромагнитные полуэлементы; 3 — кольцевой ферритовый модулятор; 4, 5 — цилиндрические магниты; 6, 7 — приемные катушки; 8 — упругий подвес; 9, 10, 11 и 12, 13, 14 — наборы кольцевых ЧЭ с упругим струнным подвесом; 15 — опорное основание, жестко закрепленное на геофизической среде 16

к подмагничивающему полю H_0 , а соответственно, и к появлению разностного сигнала на выходе ИД.

Используя различные наборы высокочастотных резонансных ЧЭ в виде колец с соответствующими струнными упругими подвесами, можно создать вариант частотно-избирательной системы с определенным спектром регистрируемых частот (рис. 6).

Каждый из резонансных ЧЭ такой частотно-избирательной системы настроен на определенную частоту вибрационных воздействий, которые, в свою очередь, вызывают появление на выходе ИД соответствующего информационного спектра напряжений электрических сигналов. Параметры сигналов каждого из спектров характеризуют те или иные свойства исследуемого объекта или процесса.

Инерциальная система регистрации на базе индукционного зонда

Вариант конструктивного исполнения инерциальной системы регистрации, реализующей принцип ориентационного зондирования, представлен на рис. 7.

Рассматриваемая инерциальная система регистрации вибрационных возмущений представляет собой совокупность двух функциональных элементов — индукционного зонда, использующего в качестве датчика многоэлементную ферритовую антенну [4], и дискового инерционного элемента.

В состав индукционного зонда (рис. 7) входят: кольцевой ферритовый элемент 1; стержневые цилиндрические ферритовые сердечники 2, 3, 4 и 5; идентичные приемные катушки 6, 7, 8 и 9; генераторная катушка 10 с обмоткой 11. Совокупность элементов 1, ..., 9 индукционного зонда функционально образуют многоэлементную ферромагнитную антенну крестовидной формы. Генераторная катушка 10 и приемные катушки находятся в одной плоскости ортогонально по отношению друг к другу, что обеспечивает необходимый уровень геометрической компенсации первичного поля. В качестве инерционного элемента (ИЭ) используется элек-

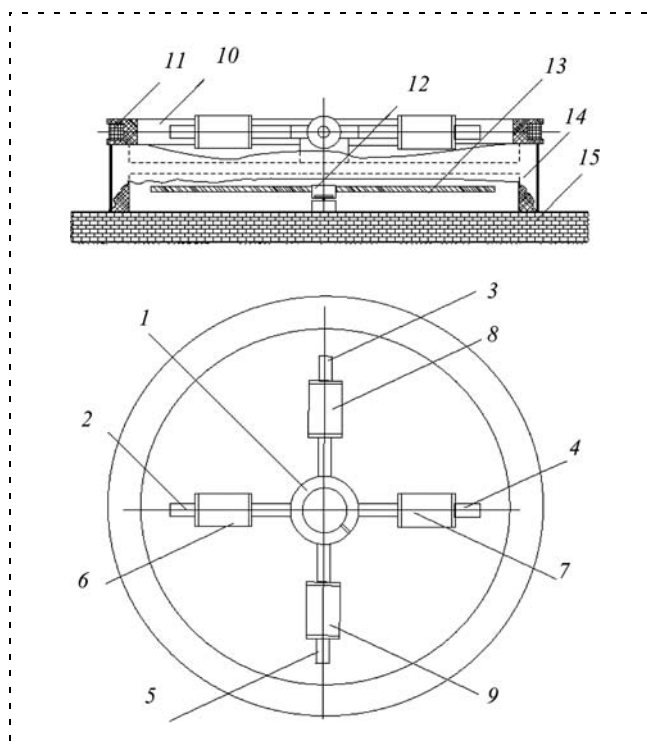


Рис. 7. Инерциальная система регистрации

тропроводящее немагнитное подстилающее основание 13 на упругом подвесе 12. Ферромагнитная антенна и генераторная катушка располагаются на неподвижном общем диэлектрическом основании 14, закрепленном на геофизической среде 15.

Рассмотрим одну из пар сердечников антенны (2 и 4) с соответствующими приемными катушками (6 и 7), имеющими одинаковые форму, размеры и число витков обмотки. В этом случае одна из катушек условно выполняет функции компенсационной обмотки по случайному сигналу.

Приемные катушки 6 и 7 расположены, соответственно, на сердечниках 2 и 4 симметрично относительно главных осей симметрии кольцевого ферритового элемента 1 (модулятор). Такое конструктивное решение обеспечивает взаимное ортогональное расположение генераторной катушки 10 и приемных катушек 6, 7. При такой пространственной ориентации генераторной и приемных катушек будет выполняться условие начального равенства нуля коэффициента их взаимоиндукции.

Индуктивность и активное сопротивление компенсационной обмотки обозначим L_K и R_K , приняв в качестве компенсационного напряжения индуцируемую в ней ЭДС E_K . Введем аналогичные параметры L_{Π} и R_{Π} для приемной обмотки. По предположению $L_K = L_{\Pi}$, $R_K = R_{\Pi}$, а следовательно, фазовое условие баланса $L_K/L_{\Pi} = R_K/R_{\Pi} = \tau$ соблюдается при подключении компенсационной катушки параллельно приемной катушке, если параметр $\tau = 1$. Последнее требование означает, что амплитудное

условие баланса $U_{K0}/E_{\Pi 0} = \tau$ будет выполнено, только если ЭДС приемной и компенсационной катушек в воздухе одинаковы, т. е. $E_{K0} = E_{\Pi 0}$.

На практике последнее равенство можно обеспечить, располагая эти катушки определенным образом относительно генераторной катушки (взаимно ортогонально).

ЭДС приемной и компенсационной катушек можно выразить суммами:

$$\dot{E}_{\Pi} = \dot{E}_{\Pi 0} + \Delta \dot{E}_{\Pi}; \dot{E}_K = \dot{E}_{K0} + \Delta \dot{E}_K,$$

где $\dot{E}_{\Pi 0}$ и \dot{E}_{K0} — ЭДС приемной и компенсационной катушек в воздухе; $\Delta \dot{E}_{\Pi}$ и $\Delta \dot{E}_K$ — приращение этих величин под воздействием исследуемой среды.

Тогда напряжение, появляющееся на выходе этой антенны под воздействием окружающей среды, частью которой является и ИЭ, определится как половина разностного приращения ЭДС катушек:

$$\dot{U} = 0,5(\Delta \dot{E}_{\Pi} - \Delta \dot{E}_K).$$

Согласно приведенному выражению предлагаемый вариант компоновки ферромагнитной антенны полностью исключает влияние внешней однородной помехи, обеспечивает отсутствие емкостных токов и глубокую компенсацию ЭДС катушек в воздухе.

Аналогичным образом реализуются физические процессы и во второй ферромагнитной антенне, образованной парой ферритовых сердечников (3 и 5) с соответствующими приемными катушками (8 и 9).

Рассмотрим более подробно принцип действия данного индукционного зонда.

Возможность осевого перемещения вдоль сердечников соответствующих приемных катушек позволяет обеспечить необходимый уровень начальной компенсации сигнала первичного поля. Поле генераторной катушки воздействует на ИЭ (13), в котором наводятся соответствующие токи. Вследствие этого появляется вторичное магнитное поле, которое переизлучается и в дальнейшем воспринимается как катушками 6 и 7, так и катушками 8 и 9. В случае сохранения исходной пространственной симметрии во взаимном расположении плоскости зонда и плоскости ИЭ состояние компенсации не нарушается. При возникновении колебаний геофизической среды ИЭ выводится из равновесия и начинает совершать осциллирующие движения относительно оси упругого подвеса 12. Появляется пространственная асимметрия во взаимном расположении плоскости индукционного зонда и плоскости ИЭ, что приводит к нарушению начальной компенсации первичного поля. В результате и на выходах каждой из пар приемных катушек (6 и 4; 8 и 9), включенных дифференциально, появляются соответствующие напряжения переменного тока,

амплитуды и фазы которых фактически характеризуют параметры вибрационных возмущений. Электрические сигналы от каждой из пар приемных катушек поступают на соответствующие каналные усилители.

Заключение

Разработанные ИД в зависимости от класса поставленных задач (измерение ускорения, смещения и т. д.) могут располагаться как непосредственно на объекте, так и бесконтактно. Их отличают расширенные амплитудно- и фазочастотные характеристики; помехоустойчивость и строгие допуски на влияние неизмеряемых компонентов вибрации; ориентированность на работу в системах автоматического управления машин, создающих технологическую вибрацию.

Универсальность физических свойств нового класса ИД позволяет их использовать не только в системах вибродиагностики, но и для решения це-

лого ряда дополнительных задач, связанных с регистрацией естественных физических полей Земли: геомагнитного, электромагнитного (разной природы) и сейсмического (поле упругих колебаний в результате землетрясений) [5].

Список литературы

1. Кирпичев А. А., Смирнов В. В., Симчук А. А. Совершенствование метрологического обеспечения проектирования и производства виброизмерительной аппаратуры // Мир неразрушающего контроля. 2004. № 2 (24). С. 20–23.
2. Брякин И. В., Духанин М. А., Першакова Е. Ю. Феррозондовый магнитометр с конденсаторным элементом возбуждения // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2002. С. 135–145.
3. Брякин И. В. Методы и средства подповерхностного зондирования // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2006. С. 116–126.
4. Брякин И. В. Индукционный зонд для обнаружения подповерхностных объектов // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2007. С. 116–126.
5. Брякин И. В. Ферромодуляционный сейсмоприемник. Вестник Казахского национального технического университета им. К. И. Сатпаева. № 4 (67). Алматы, 2008. С. 131–137.

УДК 62.52:621.9.06

А. Е. Епишкин, канд. техн. наук, доц.,

В. М. Шестаков, д-р техн. наук, проф.,

Санкт-Петербургский институт машиностроения

(ЛМЗ-ВТУЗ)

epishkin@mail.ru

Способы подавления электромеханического резонанса при пуске вибрационных установок

Предложен способ преодоления электромеханического резонанса (эффекта Зоммерфельда) для многороторных вибрационных установок (ВУ) посредством противофазного вращения дебалансов. Создано адекватное математическое описание электромеханической системы четырехроторной ВУ, выполнено имитационное моделирование пусковых режимов, подтвердившее эффективность разработанных алгоритмов управления.

Ключевые слова: вибрационные установки, механический резонанс, эффект Зоммерфельда, электромеханические системы, способы управления

Технологические режимы вибрационных установок (ВУ) требуют изменения скорости дебалансных роторов (ДР) в широком диапазоне, поэтому в ряде случаев приходится выходить в зарезонансную зону работы электромеханических систем (ЭМС) [1]. При пуске ВУ в период прохождения ЭМС резонансной зоны наблюдаются "застывание" системы электропривода (СЭП) и интенсивные упругие колебания платформы, обуславливающие удары в ис-

полнительном механизме и выход из строя пружинных виброизоляторов. Данное явление известно также как эффект Зоммерфельда [2], наблюдаемый в СЭП с мягкими механическими характеристиками.

В процессе исследования эффекта Зоммерфельда в унифицированных СЭП с подчиненным регулированием параметров нами был предложен ряд способов его преодоления [3]:

- применение электродвигателей с высокой перегрузочной способностью (высокомоментных двигателей);
- более интенсивный пуск ВУ;
- повышение жесткости механических передач приводов;
- введение контуров скорости, обеспечивающих жесткость механических характеристик приводных электродвигателей;
- введение дополнительных средств электротехнической коррекции СЭП (ПД-коррекции по скорости ДР; ПД-коррекции по скорости платформы; П-коррекции по ускорению платформы).

В последнем случае наибольший эффект дала коррекция по скорости платформы на вход контура тока двигателя.

Дальнейшие исследования показали, что эффект Зоммерфельда усиливается при увеличении числа ДР, т. е. задача преодоления электромеханического резонанса для многороторных установок является наиболее актуальной.

Следует отметить, что в многороторных ВУ открываются новые возможности подавления эффекта Зоммерфельда. При соответствующем построении взаимосвязанной ЭМС существенный эффект может дать управление фазовым рассогласованием ДР в период прохождения резонансной зоны. Рассмотрим предложенный способ на примере четырехроторных установок.

Кинематические схемы и математические модели ЭМС установок

Рациональные кинематические схемы механической части ВУ с крестообразным расположением роторов показаны на рис. 1 (вид спереди, сверху и сбоку), где введены обозначения: П — платформа; ПВ — пружинные виброизоляторы; 1, ..., 4 — ДР; m_{Π} , m_{δ} — массы платформы и дебалансов; ρ_{δ} , $\varphi_{\delta i}$, F_i — радиусы инерции, углы поворота и вынуждающие силы ДР; φ_{Π} , ψ_{Π} , χ_{Π} — углы поворота П относительно осей Z , Y , X ; c , b — эквивалентная жесткость и демпфирование ПВ. Пары ДР расположены симметрично относительно центра инерции ВУ, а их оси направлены так, чтобы получить гармонические колебания П по координатам y_{Π} , z_{Π} , x_{Π} , φ_{Π} , χ_{Π} ($\psi_{\Pi} = 0$). При этом пара 1–2 генерирует колебания в плоскости YX , а пара 3–4 — в плоскости YZ . Управляя скоростью и взаимным расположением ДР, можно получить достаточно широкий спектр пространственных колебаний П с амплитудами $y_{\Pi \min} < y_{\Pi} < y_{\Pi \max}$; $z_{\Pi \min} < z_{\Pi} < z_{\Pi \max}$; $x_{\Pi \min} < x_{\Pi} < x_{\Pi \max}$; причем минимальные (нулевые) значения получаются при противофазном, а максимальные — при синфазном вращении ДР по соответствующим координатам.

Для получения динамических моделей ВУ используют уравнения Лагранжа 2-го рода, на основании которых можно построить отдельные модели механической части ВУ по координатным осям Y , Z , X .

Уравнение поступательного движения платформы по оси Y :

$$m_0 \ddot{y}_{\Pi} + b_Y \dot{y}_{\Pi} + c_Y y_{\Pi} + m_0 g = F_{1Y} + F_{2Y} + F_{3Y} + F_{4Y}, \quad (1)$$

где $F_{iY} = m_{\delta} \rho_{\delta} (\ddot{\varphi}_{\delta i} \sin \varphi_{\delta i} - \dot{\varphi}_{\delta i}^2 \cos \varphi_{\delta i})$, $i = 1, 2, 3, 4$;
 $m_0 = m_{\Pi} + 4m_{\delta}$.

Уравнение поступательного перемещения платформы по оси Z :

$$m_0 \ddot{z}_{\Pi} + b_Z \dot{z}_{\Pi} + c_Z z_{\Pi} = F_{3Z} + F_{4Z}, \quad (2)$$

где $F_{iZ} = m_{\delta} \rho_{\delta} (\ddot{\varphi}_{\delta i} \cos \varphi_{\delta i} + \dot{\varphi}_{\delta i}^2 \sin \varphi_{\delta i})$, $i = 3, 4$.

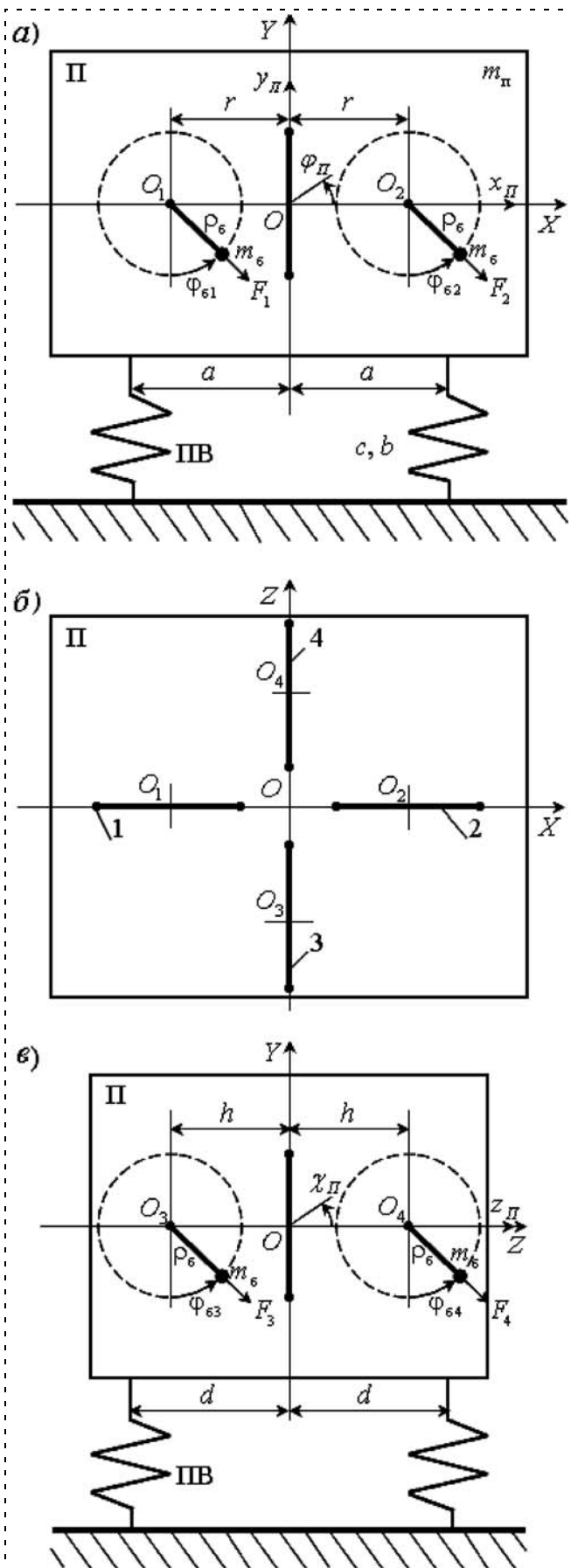


Рис. 1. Расчетные кинематические схемы четырехроторной виброустановки

Уравнение углового движения платформы относительно оси Z :

$$J_{0Z}\ddot{\varphi}_{\Pi} + b_{\gamma}a^2\dot{\varphi}_{\Pi} + c_{\gamma}a^2\varphi_{\Pi} = M_{1Z} + M_{2Z}, \quad (3)$$

где $J_{0Z} = J_{nZ} + 2m_{\delta}r^2$; $M_{iz} = m_{\delta}\rho_{\delta}r(\pm\ddot{\varphi}_{\delta i}\sin(\varphi_{\delta i} - \varphi_{\Pi}) \mp \dot{\varphi}_{\delta i}^2\cos(\varphi_{\delta i} - \varphi_{\Pi}))$.

Уравнение поступательного перемещения платформы по оси X :

$$m_0\ddot{x}_{\Pi} + b_X\dot{x}_{\Pi} + c_Xx_{\Pi} = F_{1X} + F_{2X}, \quad (4)$$

где $F_{iX} = m_{\delta}\rho_{\delta}(\ddot{\varphi}_{\delta i}\cos\varphi_{\delta i} + \dot{\varphi}_{\delta i}^2\sin\varphi_{\delta i})$, $i = 1, 2$.

Уравнение углового движения платформы относительно оси X :

$$J_{0X}\ddot{\chi}_{\Pi} + b_{\gamma}d^2\dot{\chi}_{\Pi} + c_{\gamma}d^2\chi_{\Pi} = M_{3X} + M_{4X}, \quad (5)$$

где $J_{0X} = J_{nX} + 2m_{\delta}h^2$; $M_{iX} = m_{\delta}\rho_{\delta}h(\mp\ddot{\varphi}_{\delta i}\sin(\varphi_{\delta i} - \chi_{\Pi}) \pm \dot{\varphi}_{\delta i}^2\cos(\varphi_{\delta i} - \chi_{\Pi}))$.

Уравнения движения дебалансных роторов:

$$J_i\ddot{\varphi}_{\delta i} = M_{di} - M_{ci} - M_{\delta i}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (6)$$

где $J_i = J_{\delta i} + m_{\delta}\rho_{\delta}^2$; M_{di} — моменты электродвигателей; M_{ci} — моменты сопротивления ДР; $M_{\delta i}$ — гармонические моменты сопротивления ДР:

$$M_{\delta 1} = m_{\delta}\rho_{\delta}(\ddot{y}_{\Pi}\sin\varphi_{\delta 1} + \ddot{x}_{\Pi}\cos\varphi_{\delta 1} + g\sin\varphi_{\delta 1} - r(\ddot{\varphi}_{\Pi}\sin(\varphi_{\delta 1} - \varphi_{\Pi}) - \dot{\varphi}_{\Pi}^2\cos(\varphi_{\delta 1} - \varphi_{\Pi}));$$

$$M_{\delta 2} = m_{\delta}\rho_{\delta}(\ddot{y}_{\Pi}\sin\varphi_{\delta 2} + \ddot{x}_{\Pi}\cos\varphi_{\delta 2} + g\sin\varphi_{\delta 2} - r(-\ddot{\varphi}_{\Pi}\sin(\varphi_{\delta 2} - \varphi_{\Pi}) - \dot{\varphi}_{\Pi}^2\cos(\varphi_{\delta 2} - \varphi_{\Pi}));$$

$$M_{\delta 3} = m_{\delta}\rho_{\delta}(\ddot{y}_{\Pi}\sin\varphi_{\delta 3} + \ddot{z}_{\Pi}\cos\varphi_{\delta 3} + g\sin\varphi_{\delta 3} - h(\ddot{\chi}_{\Pi}\sin(\varphi_{\delta 3} - \chi_{\Pi}) - \dot{\chi}_{\Pi}^2\cos(\varphi_{\delta 3} - \chi_{\Pi}));$$

$$M_{\delta 4} = m_{\delta}\rho_{\delta}(\ddot{y}_{\Pi}\sin\varphi_{\delta 4} + \ddot{z}_{\Pi}\cos\varphi_{\delta 4} + g\sin\varphi_{\delta 4} - h(-\ddot{\chi}_{\Pi}\sin(\varphi_{\delta 4} - \chi_{\Pi}) - \dot{\chi}_{\Pi}^2\cos(\varphi_{\delta 4} - \chi_{\Pi})).$$

На основании уравнений (1)–(6) можно построить динамическую структурную схему (ДСС) механической части четырехроторной ВУ в координатных осях Y, Z, X с соответствующими движениями платформы $y_{\Pi}, z_{\Pi}, \varphi_{\Pi}, x_{\Pi}, \chi_{\Pi}$, показанную в правой части рис. 2.

Регулирующая часть СЭП выполнена с индивидуальным приводом ДР, а управление колебательными режимами ВУ происходит путем регулирова-

ния разности фаз дебалансов. При использовании структур подчиненного регулирования первый привод является ведущим с контурами тока и скорости, а второй, третий и четвертый приводы — ведомыми с контурами тока, скорости и положения.

Реализация данной концепции построения взаимосвязанной ЭМС представлена на рис. 2, где введены следующие обозначения: ЗС — задатчик скорости ведущего привода; ЗП — задатчики положения ведомых приводов; РП, РС, ЗКТ — регулятор положения, скорости и замкнутые контуры тока с соответствующими передаточными функциями $W_{РП}(p), W_{РС}(p), W_{ЗКТ}(p)$; ДС, ФД — датчики скорости ($k_{ОС}, T_{ДС}$) и фазовые дискриминаторы ($k_{ФД}$); k_p — коэффициенты передачи редукторов; k_M — коэффициенты момента электродвигателей, в качестве которых могут быть использованы двигатели постоянного тока или вентильные двигатели, питаемые от транзисторных преобразователей. Для надежного управления режимами работы ВУ и подавления оборотных биений скоростей ДР требуется достаточно высокое быстродействие СЭП [3]. При этом контуры тока двигателей имеют частоты среза $\omega_c = 200 \dots 250 \text{ с}^{-1}$, контуры скорости $\omega_c = 100 \dots 120 \text{ с}^{-1}$, контуры положения $\omega_c = 50 \dots 60 \text{ с}^{-1}$, причем для поддержания фазового рассогласования θ ДР необходимо, чтобы выполнялось условие $\omega_c > \omega_y$ (ω_y — частота упругих колебаний платформы).

Имитационное исследование алгоритмов управления ЭМС в резонансной зоне

Одним из достоинств рассмотренной структуры механической части ВУ является возможность достижения квазистатического режима, когда платформа практически не совершает колебаний при вращающихся ДР. Для этого необходимо, чтобы сумма векторов вынуждающих сил и моментов, действующих на платформу Π со стороны дебалансов, была равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^4 \bar{F}_{iX} = 0, \quad \sum_{i=1}^4 \bar{F}_{iY} = 0, \quad \sum_{i=1}^4 \bar{F}_{iZ} = 0;$$

$$\sum_{i=1}^4 \bar{M}_{iX} = 0, \quad \sum_{i=1}^4 \bar{M}_{iZ} = 0. \quad (7)$$

Предлагаемое решение по безопасному прохождению установкой резонансных частот заключается в поддержании квазистатического режима на период преодоления зоны резонанса, для чего необходимо выполнение следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\delta 1} = -\omega_{\delta 2} = \omega_{\delta 3} = -\omega_{\delta 4}; \\ \theta_{12} = \theta_{34} = 0; \theta_{13} = \pi, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

т. е. необходимо поддержание равенства скоростей ДР с разными знаками внутри пар (приводы 1–2, 3–4) и противофазным движением между ними.

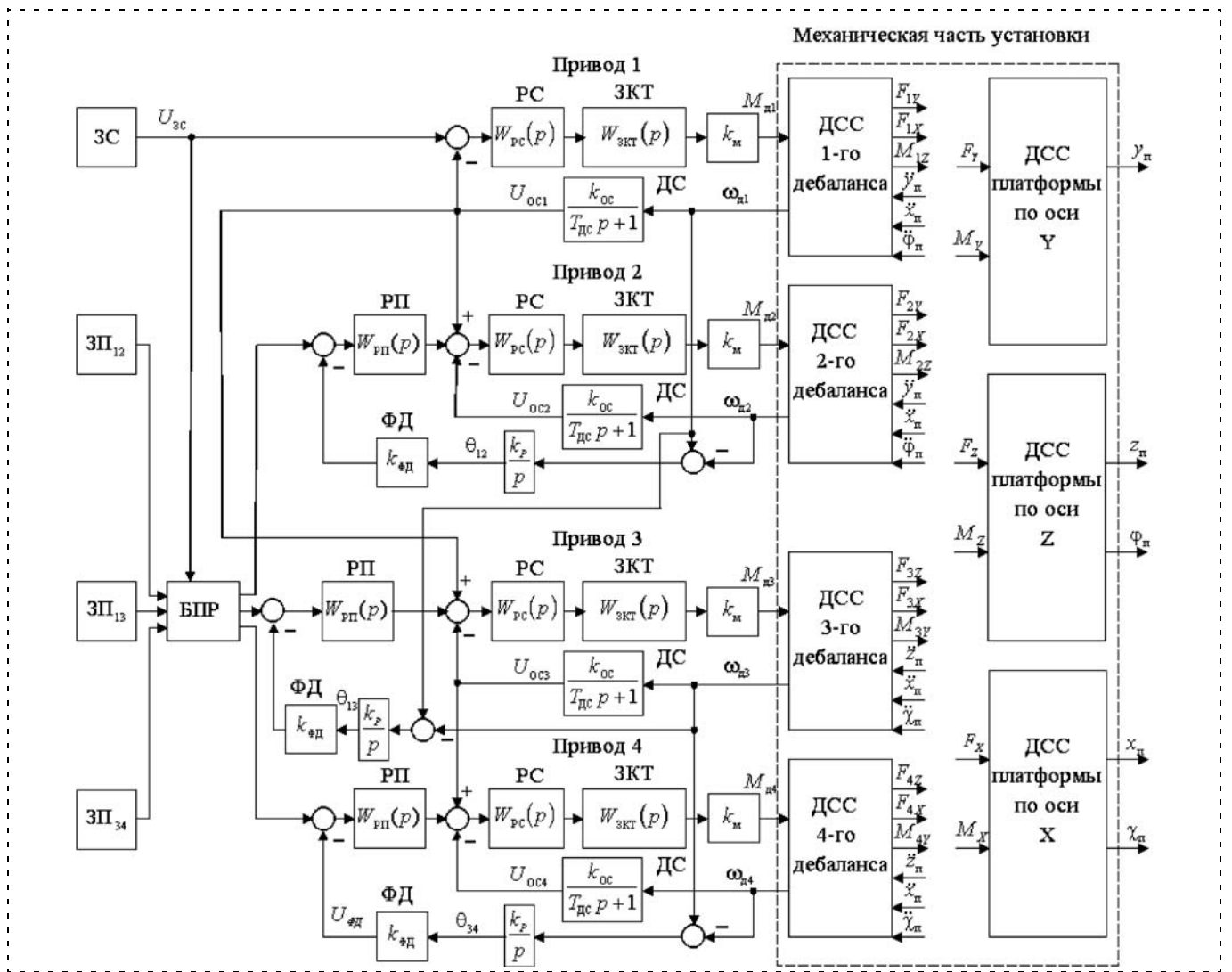


Рис. 2. Динамическая структурная схема электромеханической системы виброустановки

Имитационное моделирование взаимосвязанной ЭМС выполнено по ДСС рис. 2 в программной среде MATLAB-Simulink. Блок преодоления ВУ резонансной частоты (БПР) выполнен в подсистеме при использовании редактора Stateflow, идентифицирующего состояния ЭМС с переключением алгоритмов управления. В дорезонансной зоне углы θ между дебалансами определяются заданием. При вхождении в зону резонанса ($\omega_{\text{б}i} \approx \omega_y$) система управления переходит в состояние с реализацией алгоритма (8). При выходе в зарезонансную зону наступает восстановление заданных углов θ ДР. При торможении ВУ происходит обратный процесс.

Исследование процессов пуска и торможения ЭМС четырехроторной виброустановки выполнено при оценочных параметрах с частотой резонанса $\omega_y \approx 30 \text{ с}^{-1}$. Пуск в зарезонансную область на $\omega_{\text{б}} = 1,5\omega_y$ выполняется подачей линейно растущего сигнала задания скорости ведущего ДР с подавлением эффекта Зоммерфельда (рис. 3, а, см вторую

сторону обложки). Там же представлены процессы управления углами рассогласования дебалансов при прохождении резонансной зоны в период $t_{\text{рез}} = 8...12 \text{ с}$, где видна четкая отработка алгоритма (8). На рис. 3, б (см. вторую сторону обложки) показаны осциллограммы линейных и угловых колебаний виброплатформы, подтверждающие подавление резонанса в ЭМС ВУ. Аналогичный результат был получен и при торможении установки из зарезонансной зоны, что дает основание рекомендовать предложенный способ управления системой в многороторных ВУ.

Список литературы

1. **Управление** мехатронными вибрационными установками / Под общ. ред. И. И. Блехмана, А. Л. Фрадкова. СПб: Наука, 2001.
2. **Merten F.** Untersuchungen zum Sommerfeld — Effekt mittels Simulation und Experiment. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Germany, Preprint N 6. 1995.
3. **Шестаков В. М., Епишкин А. Е.** Динамика автоматизированных электромеханических систем вибрационных установок. СПб.: СПбГПУ, 2005.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМОВ

УДК 621.01

Б. Б. Косенок, канд. техн наук, доц.,
Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С. П. Королева,
borkos@yandex.ru

Аналитические решения пространственных векторных контуров, необходимых для кинематического исследования рычажных механизмов

Приведены основные положения теории векторного моделирования, классификация векторных контуров (модулей) и полученные автором аналитические решения для двух векторных пространственных модулей. Векторное моделирование позволяет эффективно решать задачи кинематического и динамического анализа и синтеза механизмов, как ранее созданных, так и вновь создаваемых.

Ключевые слова: механизмы, управление, вектор, контур, модель, модули, аналитические решения, кинематика

Введение

Теория векторного моделирования [1] является дальнейшим развитием метода векторного замкнутого контура, известного как метод В. А. Зиновьева [2]. По сравнению с широко распространенными методами графоаналитического характера [3] метод векторного моделирования позволяет решать задачи о положениях исключительно аналитическим путем, кроме того, он позволяет структурировать векторные модели по характерным признакам, та-

ким как список функций, что имеет практический смысл при исследовании различных контурных систем. На рис. 1 приведен простейший пример замены механизма векторной моделью.

При проектировании механических устройств предпочтительней иметь заранее разработанный математический аппарат, с помощью которого можно было бы решать задачи кинематического и динамического анализа и синтеза. Метод векторного моделирования наиболее полно подходит на роль такого математического аппарата.

Описание метода векторного моделирования

Векторный метод моделирования базируется на следующих основных определениях и положениях.

Модуль векторной модели — векторный замкнутый контур или минимальная по составу система взаимосвязанных векторных замкнутых контуров с определенностью между функциями и аргументами. Под определенностью между функцией и аргументом будем понимать возможность вычисления значений функций контура по заданным значениям его аргументов и констант. Все многообразие векторных модулей можно разделить на одноконтурные (простые) и многоконтурные (с обратными или дополнительными связями). В общем случае многообразие модулей с дополнительными связями параметров не ограничено, но аналитические решения для их функций могут быть получены на основе решений для элементарных модулей.

Элементарный векторный модуль — одноконтурный модуль с числом функций, равным числу измерений контура (рис. 2).

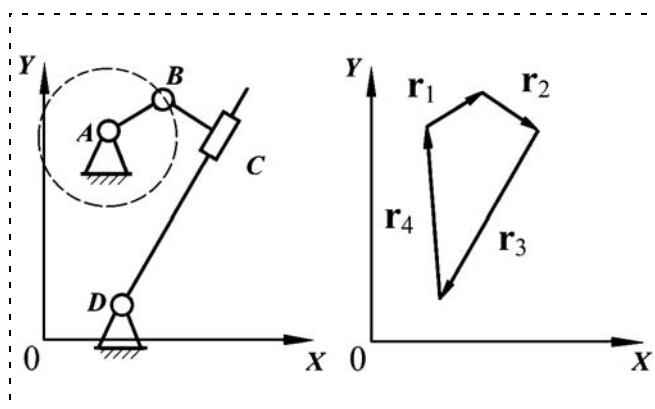


Рис. 1. Структурная схема механизма и ее векторный контур

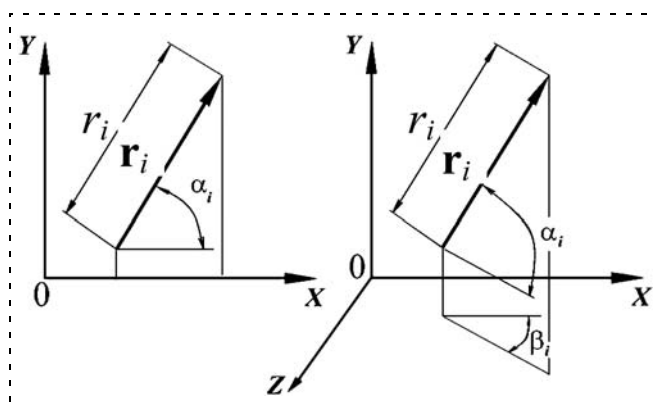


Рис. 2. Параметры плоского и пространственного векторов

Элементарные пространственные и плоские векторные модули

Модуль	Функции			Макс. число решен.	Основные аргументы — любые параметры векторов не равные функциям модуля																			
	u_1	u_2	u_3		r_i	α_i	β_i	r_j	α_j	β_j	r_k	α_k	β_k	r_{i1}	α_{i1}	β_{i1}	r_{i2}	α_{i2}	β_{i2}					
Пространственные																								
Пр1	r_i	α_i	β_i	1														x	x	x	x	x	x	x
Пр2	r_i	α_i	r_j	1			x		x	x								x	x	x	x	x	x	x
Пр3	r_i	α_i	α_j	2			x	x		x								x	x	x	x	x	x	x
Пр4	r_i	α_i	β_j	2			x	x	x									x	x	x	x	x	x	x
Пр5	r_i	β_i	r_j	2		x			x	x								x	x	x	x	x	x	x
Пр6	r_i	β_i	α_j	4		x			x									x	x	x	x	x	x	x
Пр7	r_i	β_i	β_j	2		x			x									x	x	x	x	x	x	x
Пр8	α_i	β_i	r_j	2	x				x	x								x	x	x	x	x	x	x
Пр9	α_i	β_i	α_j	2	x				x									x	x	x	x	x	x	x
Пр10	α_i	β_i	β_j	2	x				x									x	x	x	x	x	x	x
Пр11	r_i	r_j	r_k	1		x	x		x	x		x	x					x	x	x	x	x	x	x
Пр12	r_i	r_j	α_k	2		x	x		x	x	x							x	x	x	x	x	x	x
Пр13	r_i	r_j	β_k	2		x	x		x	x	x	x						x	x	x	x	x	x	x
Пр14	r_i	α_j	α_k	4		x	x	x		x	x	x						x	x	x	x	x	x	x
Пр15	r_i	α_j	β_k	4		x	x	x		x	x	x						x	x	x	x	x	x	x
Пр16	α_i	α_j	α_k	8	x		x	x		x	x	x						x	x	x	x	x	x	x
Пр17	α_i	α_j	β_k	8	x		x	x		x	x	x						x	x	x	x	x	x	x
Пр18	β_i	β_j	r_k	2	x	x		x	x				x	x				x	x	x	x	x	x	x
Пр19	β_i	β_j	α_k	4	x	x		x	x	x								x	x	x	x	x	x	x
Пр20	β_i	β_j	β_k	∞	x	x		x	x	x								x	x	x	x	x	x	x
Плоские																								
	u_1	u_2			r_i	α_i	r_j	α_j	r_{i1}	α_{i1}	r_{i2}	α_{i2}												
Пл1	r_i	α_i	1						x	x	x	x												
Пл2	r_i	r_j	1			x		x	x	x	x	x												
Пл3	r_i	α_j	2			x	x		x	x	x	x												
Пл4	α_i	α_j	2		x		x		x	x	x	x												

Условие замкнутости m -векторного контура на плоскости может быть представлено в скалярном виде:

$$\sum_{i=2}^m r_i \cos \alpha_i = 0; \tag{1}$$

$$\sum_{i=2}^m r_i \sin \alpha_i = 0. \tag{2}$$

Система уравнений (1)–(2) позволяет определить любые два из $2m$ параметров плоского векторного замкнутого контура. Аналогично, любые три из $3m$ параметров пространственного векторного замкнутого контура позволяет определить система

$$\sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i \cos \beta_i = 0;$$

$$\sum_{i=1}^m r_i \sin \alpha_i = 0; \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i \sin \beta_i = 0.$$

Основные сочетания по две функции для плоского и по три функции для пространственного векторного замкнутого контура определяют ограничен-

ное множество стандартных векторных замкнутых контуров — элементарных модулей. Как видно из таблицы, таких сочетаний может быть четыре для плоскости и двадцать для пространства. Анализ геометрического смысла для плоских и пространственных модулей позволил определить максимальное число решений для каждого из них. Следует отметить, что четыре из них могут иметь по четыре, а два — по восемь решений [4]

Ранее для всех плоских и большинства пространственных элементарных модулей были найдены аналитические решения [2–5]. В данной статье приведены аналитические решения для пространственных модулей Пр12 и Пр13.

Аналитические решения для пространственных модулей Пр12 и Пр13

Пространственный модуль Пр12 (функции r_1, r_2, α_3).

Предварительно из системы уравнений (3)–(5) для векторного контура (рис. 3) получена система двух уравнений, не содержащих параметр r_1 :

$$Y_2 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 = X_2 \sin \alpha_1; \tag{4}$$

$$Y_2 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 = Z_2 \sin \alpha_1, \tag{5}$$

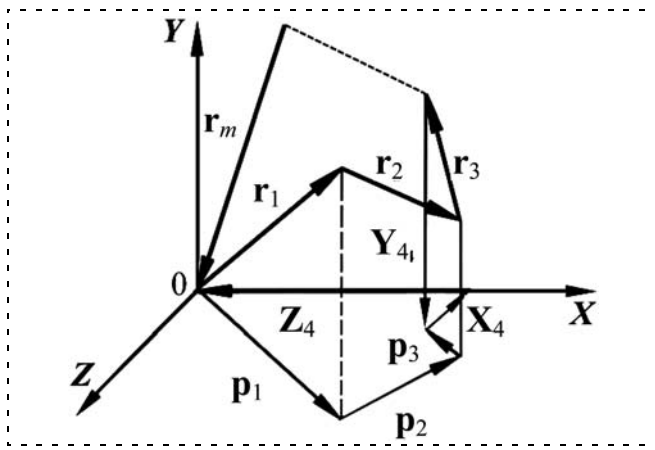


Рис. 3. Пространственный модуль Пр12

где

$$X_2 = r_2 \cos \alpha_2 \cos \beta_2 + X_3; \quad X_3 = r_3 \cos \alpha_3 \cos \beta_3 + X_4;$$

$$Y_2 = r_2 \sin \alpha_2 + Y_3; \quad Y_3 = r_3 \sin \alpha_3 + Y_4;$$

$$Z_2 = r_2 \cos \alpha_2 \sin \beta_2 + Z_3; \quad Z_3 = r_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_3 + Z_4;$$

$$X_4 = \sum_{i=4}^m r_i \cos \alpha_i \cos \beta_i;$$

$$Y_4 = \sum_{i=4}^m r_i \sin \alpha_i;$$

$$Z_4 = \sum_{i=4}^m r_i \cos \alpha_i \sin \beta_i.$$

Тогда из уравнений (4) и (5) можно получить

$$r_2 (\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \sin \alpha_1) = X_3 \sin \alpha_1 - Y_3 \cos \alpha_1 \cos \beta_1; \quad (6)$$

$$r_2 (\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 - \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \alpha_1) = Z_3 \sin \alpha_1 - Y_3 \cos \alpha_1 \sin \beta_1. \quad (7)$$

Исключив r_2 , получим

$$e_{11} (Z_3 \sin \alpha_1 - Y_3 \cos \alpha_1 \sin \beta_1) = e_{12} (X_3 \sin \alpha_1 - Y_3 \cos \alpha_1 \cos \beta_1); \quad (8)$$

где $e_{11} = \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \sin \alpha_1$;

$e_{12} = \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 - \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \alpha_1$.

Разложив X_3 , Y_3 , Z_3 и подставив их в (8), получим

$$e_{11} [(r_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_3 + Z_4) \sin \alpha_1 - (r_3 \sin \alpha_3 + Y_4) \times \cos \alpha_1 \sin \beta_1] = e_{12} [(r_3 \cos \alpha_3 \cos \beta_3 + X_4) \sin \alpha_1 - (r_3 \sin \alpha_3 + Y_4) \cos \alpha_1 \cos \beta_1] \quad (9)$$

или

$$e_{11} r_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_3 \sin \alpha_1 + e_{11} Z_4 \sin \alpha_1 - e_{11} r_3 \sin \alpha_3 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 - e_{11} Y_4 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 = e_{12} r_3 \cos \alpha_3 \cos \beta_3 \sin \alpha_1 + e_{12} X_4 \sin \alpha_1 - e_{12} r_3 \sin \alpha_3 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - e_{12} Y_4 \cos \alpha_1 \cos \beta_1.$$

Примем следующие обозначения:

$$a = e_{11} r_3 \sin \beta_3 \sin \alpha_1 - e_{12} r_3 \cos \beta_3 \sin \alpha_1;$$

$$b = e_{11} Z_4 \sin \alpha_1 - e_{12} X_4 \sin \alpha_1;$$

$$c = -e_{11} r_3 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 + e_{12} r_3 \cos \alpha_1 \cos \beta_1;$$

$$d = -e_{11} Y_4 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 + e_{12} Y_4 \cos \alpha_1 \cos \beta_1.$$

Получим выражение

$$a \cos \alpha_3 + b + c \sin \alpha_3 + d = 0. \quad (10)$$

Известно, что

$$A \sin x + B \cos x = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(x + \varphi), \quad (11)$$

где угол φ находится из соотношений

$$\sin \varphi = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

Преобразуя уравнение (10), получим:

$$\sqrt{a^2 + c^2} \sin(\alpha_3 + \varphi) + b + d = 0, \quad (12)$$

где $\varphi = \arctg\left(\frac{a}{c}\right)$.

Решая уравнение (12), получим

$$\alpha_3 = \arcsin\left(-\frac{b+d}{\sqrt{a^2+c^2}}\right) - \arctg\left(\frac{a}{c}\right). \quad (13)$$

Используя (6), вычислим r_2 :

$$r_2 = \frac{X_3 \sin \alpha_1 - Y_3 \cos \alpha_1 \cos \beta_1}{\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 - \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \sin \alpha_1} \quad (14)$$

или, используя (7),

$$r_2 = \frac{Z_3 \sin \alpha_1 - Y_3 \cos \alpha_1 \sin \beta_1}{\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 - \cos \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \alpha_1}. \quad (15)$$

Тогда

$$r_1 = -\frac{r_2 \sin \alpha_2 + Y_3}{\sin \alpha_1}. \quad (16)$$

Пространственный модуль Пр13 (функции r_1 , r_2 , β_3).

Аналогичным образом, что и для модуля Пр12, предварительно из системы уравнений (3)—(5) используем систему двух уравнений (4), (5), не содержащих параметра r_1 .

Тогда аналогично получим

$$e_{11} r_3 \cos \alpha_3 \sin \beta_3 \sin \alpha_1 + e_{11} Z_4 \sin \alpha_1 - e_{11} r_3 \sin \alpha_3 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 + e_{11} Y_4 \cos \alpha_1 \sin \beta_1 = e_{12} r_3 \cos \alpha_3 \cos \beta_3 \sin \alpha_1 + e_{12} X_4 \sin \alpha_1 - e_{12} r_3 \sin \alpha_3 \cos \alpha_1 \cos \beta_1 + e_{12} Y_4 \cos \alpha_1 \cos \beta_1. \quad (17)$$

Примем следующие обозначения:

$$a = e_{11}r_3\cos\alpha_3\sin\alpha_1;$$

$$b = -e_{12}r_3\cos\alpha_3\sin\alpha_1;$$

$$c = e_{11}Z_4\sin\alpha_1 - e_{12}X_4\sin\alpha_1 - \\ - e_{11}r_3\sin\alpha_3\cos\alpha_1\sin\beta_1 + e_{12}r_3\sin\alpha_3\cos\alpha_1\cos\beta_1 + \\ + e_{11}Y_4\cos\alpha_1\sin\beta_1 - e_{12}Y_4\cos\alpha_1\cos\beta_1.$$

Получим выражение

$$a\sin\beta_3 + b\cos\beta_3 + c = 0. \quad (18)$$

Преобразуем уравнение (18):

$$\sqrt{a^2 + b^2}\sin(\beta_3 + \varphi) + c = 0, \quad (19)$$

где $\varphi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right)$.

Решая уравнение (19), получим

$$\beta_3 = -\arcsin\left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) - \arctg\left(\frac{b}{a}\right). \quad (20)$$

Используя (6), вычислим

$$r_2 = \frac{X_3\sin\alpha_1 - Y_3\cos\alpha_1\sin\beta_1}{\sin\alpha_2\cos\alpha_1\cos\beta_1 - \cos\alpha_2\cos\beta_2\sin\alpha_1} \quad (21)$$

или, с использованием (20),

$$r_2 = \frac{Z_3\sin\alpha_1 - Y_3\cos\alpha_1\sin\beta_1}{\sin\alpha_2\cos\alpha_1\sin\beta_1 - \cos\alpha_2\sin\beta_2\sin\alpha_1}. \quad (22)$$

Тогда

$$r_1 = -\frac{r_2\sin\alpha_2 + Y_3}{\sin\alpha_1}. \quad (23)$$

Выводы

Полученные аналитические решения (13)–(16), (20)–(23), дополняя ранее полученные решения для других модулей, позволяют решать задачи кинематического и динамического исследования как существующих, так и вновь создаваемых рычажных механизмов.

Список литературы

1. Семенов Б. П. Аналитика элементарных векторных модулей // Методическое пособие. М.: Изд-во МАИ, 1989. 40 с.
2. Зиновьев В. А. Векторный метод в структурном и кинематическом исследовании механизмов // Изв. вузов. Машиностроение. 1958. № 6. С. 3–9.
3. Аргоболовский И. И. Теория механизмов и машин / Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.
4. Семенов Б. П., Косенок Б. Б. Методы и средства динамического анализа механизмов авиационных энергоустановок. Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. 281 с.
5. Косенок Б. Б. Синтез модульных векторных моделей при проектировании устройств механизации крыла летательных аппаратов. Автореферат. Москва: МГТУ, 1996.

ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках
4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)
состоится научно-техническая конференция

"ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И УПРАВЛЕНИЕ" (ИИУ-2011)

Научные направления конференции:

- ♦ Интеллектуальный анализ данных
- ♦ Искусственный интеллект в управлении
- ♦ Системы принятия решений, планирования и моделирования
- ♦ Сетевые модели в искусственном интеллекте
- ♦ Компьютерная обработка естественно-языковых текстов и семантический поиск
- ♦ Автоматизация научных исследований и управление знаниями
- ♦ Обучающие и экспертные системы
- ♦ Прикладные интеллектуальные системы

Подробная информация о мультikonференции МКПУ-2011 размещается на сайте:
<http://www.mvs.tsure.ru>

Ф. Н. Притыкин, д-р техн. наук, зав. кафедрой,
Омский государственный
технический университет,
pritykin@mail.ru

Методы и технологии виртуального моделирования движений адаптивных промышленных роботов с использованием средств компьютерной графики

Излагается обобщенный метод, позволяющий осуществлять генерацию моделей незамкнутых кинематических цепей механизмов манипуляторов средствами компьютерной графики. Исполнительные механизмы при этом имеют сложную структуру, произвольное число степеней подвижности и представлены в виде совокупности объемных примитивов. Анализ перемещений звеньев роботов возможен для произвольной степени двигательной избыточности при построении малых движений по вектору скоростей.

Ключевые слова: виртуальное моделирование движений роботов, адаптивное управление движением роботизированных систем, синтез движений по вектору скоростей

Введение

Одной из центральных проблем, возникающих при разработке интеллектуальных роботов, является создание обобщенных управляющих систем, реализующих целенаправленное поведение и анализ двигательных возможностей исполнительных механизмов. Работоспособность данных систем виртуально оценивается с помощью средств компьютерной графики. Отсутствие универсальных программных модулей, осуществляющих указанное моделирование движений роботов, имеющих сложную произвольную структуру кинематических цепей и сложную геометрическую форму подвижных звеньев, подтверждает необходимость в разработке обобщенных методов задания и генерации геометрических моделей исполнительных механизмов [1, 2]. Известный метод задания кинематических моделей Денавита—Хартенберга не позволяет более точно задавать геометрические элементы отдельных звеньев механизма манипулятора, так как число подвижных систем координат в этом методе ограничено и принимается равным числу подвижных звеньев [3]. В указанных первоисточниках [1—3] также не рассматриваются вопросы разработки универсальных программных модулей, составленных на основе задания геометрических моделей кинематических цепей.

Постановка задачи

Все последовательные положения любого подвижного звена механизма манипулятора в неподвижном пространстве определяются значениями

обобщенных координат φ_i . Для n -звенного манипулятора таких параметров будет n : $\varphi_1, \dots, \varphi_n$. Эти параметры независимы и меняются непрерывно.

Положение узловых точек и звеньев механизма манипулятора в неподвижном пространстве определяют матрицы $\mathbf{M}_{0,1}, \mathbf{M}_{0,2}, \dots, \mathbf{M}_{0,n_m}$ размерности 4×4 [3]. Параметр n_m определяет число систем O_1, O_2, \dots, O_{n_m} , используемых при задании геометрической модели механизма манипулятора. Для предлагаемого способа задания геометрической модели механизма робота в общем случае $n_m \neq n$. Элементы $m_{\lambda\mu}^{0,k}$ матриц $\mathbf{M}_{0,k}$, где λ и μ — соответственно номер строки и столбца, вычисляются произведением матриц $\mathbf{M}_{k-1,k}$, каждая из которых описывает положение последующей k -й системы координат O_k относительно предыдущей $(k-1)$ -й системы O_{k-1} , где k — номер системы координат, используемой при задании геометрической модели механизма манипулятора ($0 < k \leq n_m$). Значения элементов матриц $\mathbf{M}_{k-1,k}$ и $\mathbf{M}_{0,k}$ можно записать соответственно в виде массивов m_{at} и m_{oki} . Номера элементов массива m_{oki} матрицы $\mathbf{M}_{0,k}$ записаны в скобках рядом с элементом матрицы:

$$\mathbf{M}_{0,k} = \begin{bmatrix} m_{11}^{0,k}(1) & m_{12}^{0,k}(2) & m_{13}^{0,k}(3) & m_{14}^{0,k}(4) \\ m_{21}^{0,k}(5) & m_{22}^{0,k}(6) & m_{23}^{0,k}(7) & m_{24}^{0,k}(8) \\ m_{31}^{0,k}(9) & m_{32}^{0,k}(10) & m_{33}^{0,k}(11) & m_{34}^{0,k}(12) \\ 0(13) & 0(14) & 0(15) & 0(16) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $m_{11}^{0,k}, m_{12}^{0,k}, \dots, m_{34}^{0,k}$ определяют координаты узловых точек механизма манипулятора или начала систем координат O_k . Номера элементов массива m_{oki} (записанные в скобках) в дальнейшем используют при вычислении элементов матриц частных передаточных отношений (МЧПО) [3].

Для расчета элементов матриц $\mathbf{M}_{k-1,k}$ используют массивы φ_i, l_k, l_{sm} и n_{kod} . Указанные массивы задают соответственно значения обобщенных координат φ_i , длины звеньев механизмов l_k , смещения вдоль осей систем координат l_{sm} , неподвижно связанных со звеньями механизма, и коды преобразований систем координат n_{kod} . Размерности массивов φ_i, l_k, l_{sm} и n_{kod} являются одинаковыми и определяются значением параметра n_m . При этом в указанных массивах в общем случае могут присутствовать пустые элементы, которые предназначены для обеспечения заданной одинаковой размерности массивов в целях организации циклов при расчетах. Возможные значения кодов преобразований систем координат при переходе от системы O_k к системе O_{k-1} представлены в табл. 1. Коды преобразова-

ний систем координат со значениями от 7 до 12 позволяют задавать большее число узловых точек и систем O_1, O_2, \dots, O_{nm} , что позволяет более точно задавать особенности конструкции звеньев исполнительного механизма. Заметим, что в каждой из систем O_k задается объемный примитив, в качестве которого могут выступать призма, усеченная пирамида, цилиндр вращения и т. п. Вид объемного

примитива и его ориентация в системе O_k определяют соответственно значения кодов n_{pr} и n_{or} . Значения массива кодов n_{kod} оказывают определяющее влияние на расчет МЧПО J, которые связывают скорости изменения положений захвата со скоростями изменения обобщенных координат.

Геометрический смысл параметров массивов φ_i , l_k и l_{sm} значений элементов массива m_{at} , задающего

Таблица 1

Значение кодов преобразований систем координат, задающих матрицы $M_{k-1,k}$

n_{kod}	Преобразования систем координат, связанных со звеньями механизмов, определяемые обобщенной координатой φ_i	n_{kod}	Тип преобразования систем координат, задающий особенности конструкции звеньев
1	Вращение вокруг оси Ox	7	Вращение вокруг оси Ox
2	Вращение вокруг оси Oy	8	Вращение вокруг оси Oy
3	Вращение вокруг оси Oz	9	Вращение вокруг оси Oz
4	Поступательное перемещение вдоль оси Ox	10	Поступательное перемещение вдоль оси Ox
5	Поступательное перемещение вдоль оси Oy	11	Поступательное перемещение вдоль оси Oy
6	Поступательное перемещение вдоль оси Oz	12	Поступательное перемещение вдоль оси Oz

Таблица 2

Соответствия значений кодов n_{kod} , параметров q_i, l_k, l_{sm} и матриц $M_{k-1,k}$

Код преобразования систем координат	1	2	3
Название функции	mvx	mvу	mvz
Параметры функции	q_i, l_k, l_{sm}	q_i, l_k, l_{sm}	q_i, l_k, l_{sm}
Элементы матриц $M_{k,k+1}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{sm} \\ 0 & \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & l_k \cos\varphi_i \\ 0 & \sin\varphi_i & \cos\varphi_i & l_k \sin\varphi_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\varphi_i & 0 & \sin\varphi_i & l_k \sin\varphi_i \\ 0 & 1 & 0 & l_{sm} \\ \sin\varphi_i & 0 & \cos\varphi_i & l_k \cos\varphi_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & 0 & l_k \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i & 0 & l_k \sin\varphi_i \\ 0 & 0 & 1 & l_{sm} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Изображения систем координат			
Код преобразования систем координат	4	5	6
Названия функции	mpxyz	mpxyz	mpxyz
Параметры функции	l_{smx}	l_{smy}	l_{smz}
Элементы матриц $M_{k,k+1}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{smx} \\ 0 & 1 & 0 & l_{smy} \\ 0 & 0 & 1 & l_{smz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		

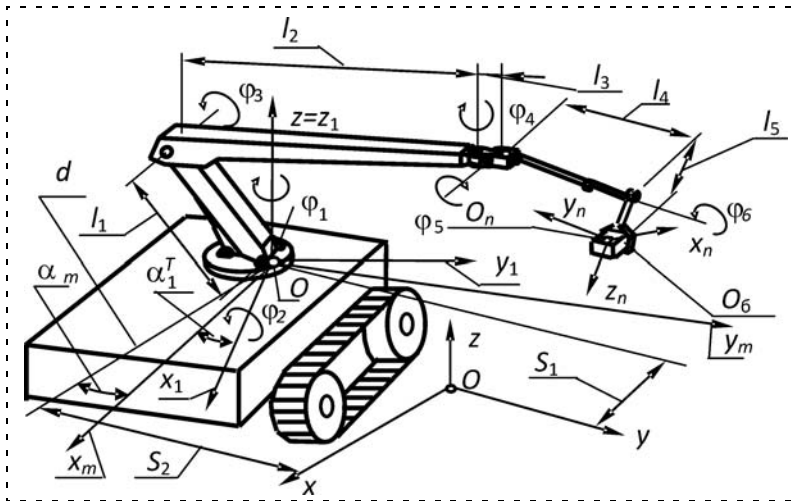


Рис. 1. Общий вид и геометрические параметры, характеризующие исполнительный механизм мобильного робота

матрицы $M_{k-1,k}$, представлены в табл. 2. Элементы массива m_{at} , соответствующие различным значениям кодов n_{kod} преобразований при переходе от системы O_k к системе O_{k-1} , вычисляются с использованием функций, mvx , mvu , mvz и $mrxuz$. Функции mvx , mvu , mvz определяют элементы массива m_{at} при вращениях системы O_k соответственно вокруг осей Ox_{k-1} , Oy_{k-1} и Oz_{k-1} , а функция $mrxuz$ — при расчете элементов списка m_{at} при поступательных смещениях системы O_k вдоль осей Ox_{k-1} , Oy_{k-1} и Oz_{k-1} .

На рис. 1 представлены изображения общего вида, а на рис. 2 — положения систем O_1, O_2, \dots, O_{nm} , связанных со звеньями механизма мобильного робота. Заметим, что с некоторыми подвижными звеньями связаны несколько систем координат O_k . Исходное положение транспортной тележки определяется координатами $x = s_1$ и $y = s_2$ и углом α_m наклона оси O_mx_m транспортной тележки к неподвижной оси координат O_0x_0 (система $O_mx_my_mz_m$ неподвижно связана с транспортной тележкой). На рис. 1 указанный угол α_m образован между прямой $d \parallel x_0$ и осью x_m . Здесь и всюду в дальнейшем знак \parallel определяет параллельность геометрических объектов. Положение механизма манипулятора задают значения φ_i обобщенных координат. Алгоритм расчета движения

мобильного робота должен определять траекторию движения базовой точки O_m транспортной тележки $s_i = f_{si}(t)$ (где $1 \leq i \leq 2$) на неподвижной плоскости $O_0x_0y_0$ и законы изменения обобщенных координат манипулятора $\varphi_j = f_{\varphi_j}(t)$ (где $1 \leq j \leq 6$). В совокупности эти перемещения будут задавать движение выходного звена и объекта манипулирования вдоль заданной траектории. Учитывая то, что положение исполнительного механизма манипулятора определяют шесть значений φ_i , являющихся обоб-

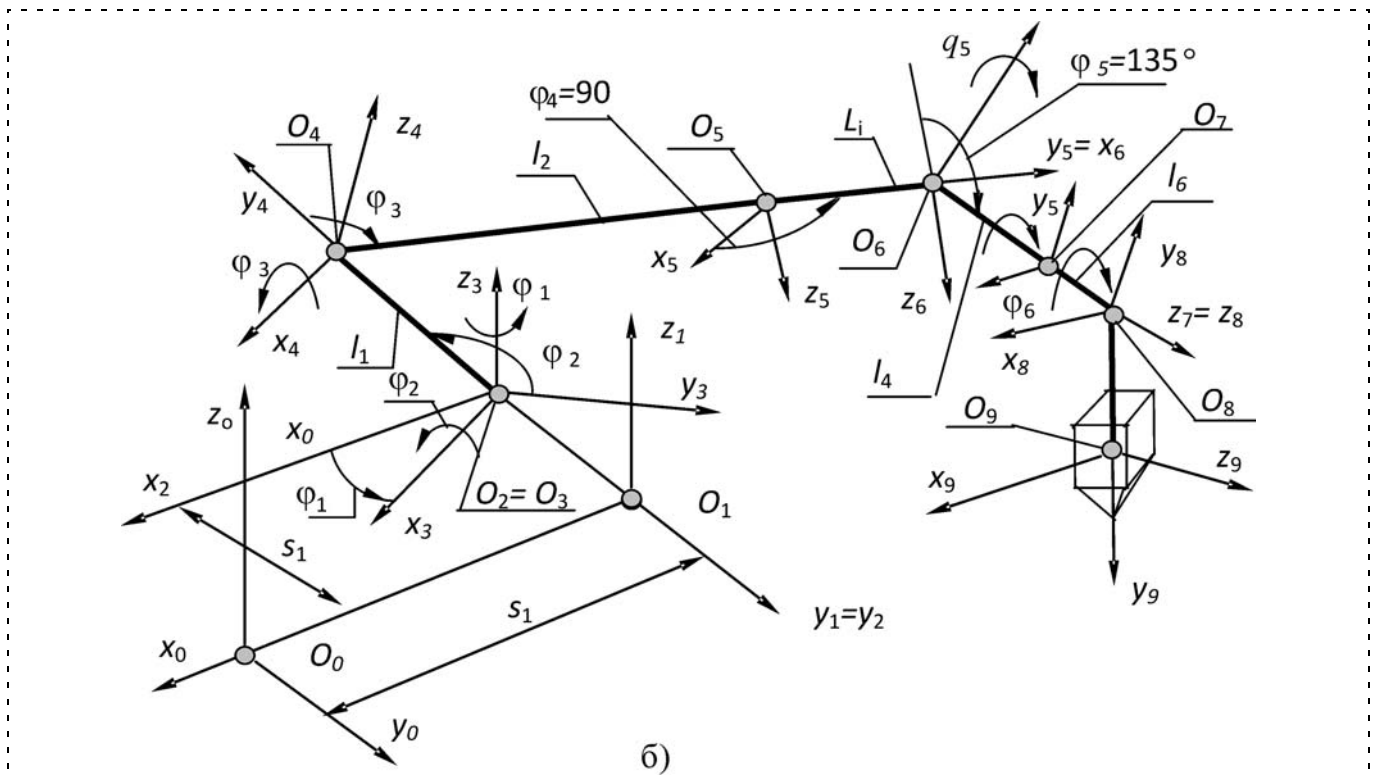


Рис. 2. Положение систем O_1, O_2, \dots, O_{nm} , связанных со звеньями механизма мобильного робота

Расчет элементов J_{rn} матрицы J на основе элементов $m_{\lambda\mu}^{0,k}$ матриц произведения $M_{0,1}, M_{0,2}, \dots, M_{0,nm}$

Вид кинемат. пары	Совпадение оси кинемат. пары с осью системы O_{k-1}	Расчет элементов J_{rn} матрицы J
Поступательная	x_{k-1}	$J_{1i} = m_{11}^{0,k-1}; J_{2i} = m_{21}^{0,k-1}; J_{3i} = m_{31}^{0,k-1};$ (для $j = 4-6$) $J_{ij} = 0$ (2)
	y_{k-1}	$J_{1i} = m_{12}^{0,k-1}; J_{2i} = m_{22}^{0,k-1}; J_{3i} = m_{32}^{0,k-1};$ (для $j = 4-6$) $J_{ij} = 0$ (3)
	z_{k-1}	$J_{1i} = m_{13}^{0,k-1}; J_{2i} = m_{23}^{0,k-1}; J_{3i} = m_{33}^{0,k-1};$ (для $j = 4-6$) $J_{ij} = 0$ (4)
Вращательная	x_{k-1}	$J_{1i} = (m_{34}^{0,n} - m_{34}^{0,k-1})m_{21}^{0,k-1} - (m_{24}^{0,n} - m_{24}^{0,k-1})m_{31}^{0,k-1};$ $J_{2i} = (m_{14}^{0,n} - m_{14}^{0,k-1})m_{31}^{0,k-1} - (m_{34}^{0,n} - m_{34}^{0,k-1})m_{11}^{0,k-1};$ (5)
		$J_{3i} = (m_{24}^{0,n} - m_{24}^{0,k-1})m_{11}^{0,k-1} - (m_{14}^{0,n} - m_{14}^{0,k-1})m_{21}^{0,k-1};$ $J_{4i} = m_{11}^{0,k-1}; J_{5i} = m_{21}^{0,k-1}; J_{6i} = m_{31}^{0,k-1}$ (6)
		$J_{1i} = (m_{34}^{0,n} - m_{34}^{0,k-1})m_{22}^{0,k-1} - (m_{24}^{0,n} - m_{24}^{0,k-1})m_{32}^{0,k-1};$ $J_{2i} = (m_{14}^{0,n} - m_{14}^{0,k-1})m_{32}^{0,k-1} - (m_{34}^{0,n} - m_{34}^{0,k-1})m_{12}^{0,k-1};$ (7)
	y_{k-1}	$J_{3i} = (m_{24}^{0,n} - m_{24}^{0,k-1})m_{12}^{0,k-1} - (m_{14}^{0,n} - m_{14}^{0,k-1})m_{22}^{0,k-1};$ $J_{4i} = m_{12}^{0,k-1}; J_{5i} = m_{22}^{0,k-1}; J_{6i} = m_{32}^{0,k-1}$ (8)
		$J_{1i} = (m_{34}^{0,n} - m_{34}^{0,k-1})m_{23}^{0,k-1} - (m_{24}^{0,n} - m_{24}^{0,k-1})m_{33}^{0,k-1};$ $J_{2i} = (m_{14}^{0,n} - m_{14}^{0,k-1})m_{33}^{0,k-1} - (m_{34}^{0,n} - m_{34}^{0,k-1})m_{13}^{0,k-1};$ (9)
		$J_{3i} = (m_{24}^{0,n} - m_{24}^{0,k-1})m_{13}^{0,k-1} - (m_{14}^{0,n} - m_{14}^{0,k-1})m_{23}^{0,k-1};$ $J_{4i} = m_{13}^{0,k-1}; J_{5i} = m_{23}^{0,k-1}; J_{6i} = m_{33}^{0,k-1}$ (10)
	z_{k-1}	

шенными координатами механизма манипулятора, а положение транспортной тележки — две координаты s_1 и s_2 (углы α_m и α_1^T учитываются при расчете угла φ_1), то число обобщенных скоростей будет равно восьми.

Синтез малых движений механизма мобильного робота основан на решении линейной системы уравнений, отражающей зависимость вектора обобщенных скоростей Q_n от вектора скоростей выходного звена (ВЗ) V_r . Данная зависимость определяется МЧПО J . Элементы J_{rn} данной матрицы J определяются на основе элементов $m_{\lambda\mu}^{0,k}$ матриц произведения $M_{0,1}, M_{0,2}, \dots, M_{0,nm}$. Индексы r и n элементов J_{rn} соответственно определяют размерности вектора обобщенных скоростей Q_n и вектора скоростей ВЗ V_r . В общем случае $n > r$. Данный способ основан на определении мгновенных передаточных отношений от i -й кинематической пары k j -й компоненте вектора V_r по методике, изложенной в работе [3]. В табл. 3 приведены соотношения, по которым определяются элементы J_{rn} матрицы J .

Элементы $m_{\lambda\mu}^{0,k}$ матриц $M_{0,k-1}$ определяют массив m_{oki} . Нумерация элементов указанных списков приведена в (1).

Программные модули для синтеза малых движений манипуляционных систем

На основе предложенного метода задания геометрических моделей механизмов роботов разработаны следующие программные модули на основе алгоритмического языка программирования A toLISP в среде ACAD.

1. Модуль, осуществляющий расчет элементов $m_{\lambda\mu}^{k-1,k}$ матриц $M_{k-1,k}$. Функция calc_mkn позволяет вычислить массив m_{kn} , элементами которого являются подмассивы, задающие матрицы $M_{0,1}, M_{1,2}, \dots, M_{k-1,k}$. На рис. 3 представлена блок-схема функции calc_mkn. Входными данными указанной функции являются массивы φ_i, l_k, l_{sm} и n_{kod} и параметр n_m . На рис. 3 обозначение m_{ati} определяет массив элементов матрицы $M_{k-1,k}$ на n_i -м шаге расчетов в соответствии с функциями mvx, mvу, mvz и mpxuz (см. табл. 2). При завершении расчетов функцией calc_mkn выходными параметрами является массив m_{kn} , состоящий из подмассивов элементов $m_{\lambda\mu}^{k-1,k}$ матриц $M_{k-1,k}$.

2. Модуль расчета элементов $m_{\lambda\mu}^{0,k}$ матриц $M_{0,k}$. Функция calc_coord позволяет вычислить массив m_{ok} , элементами которого являются подмас-

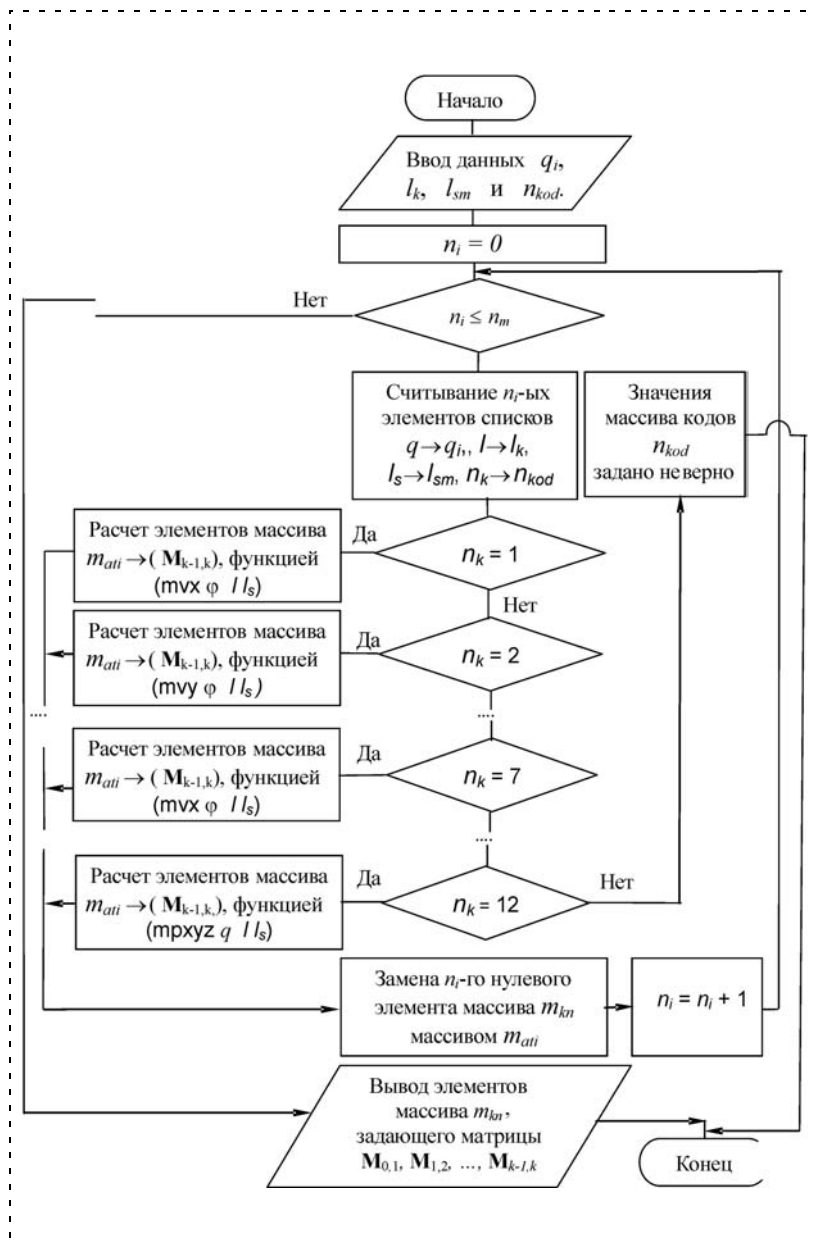


Рис. 3. Блок-схема вычисления элементов матриц $M_{k-1,k}$.
Функция calc_mkn

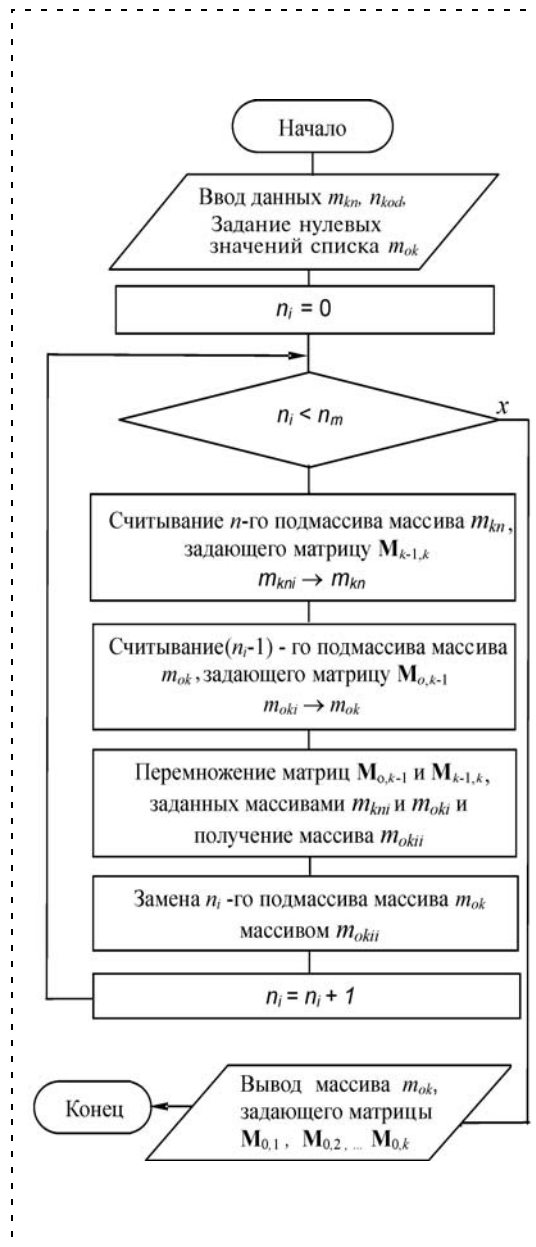


Рис. 4. Блок-схема вычисления элементов матриц $M_{0,k}$.
Функция calc_coord

Таблица 4

Объемные примитивы, используемые при задании геометрических моделей механизмов роботов

Значения кодов n_{pr} пространственных примитивов			
1	2	3	4

сивы, задающие матрицы $M_{0,1}$, $M_{0,2}$, ..., $M_{0,k}$. На рис. 4 представлена блок-схема функции `calc_coord`. Входными данными данной функции являются массивы m_{kn} и n_{kod} . Выходными данными — массив m_{ok} .

3. Модуль, формирующий изображения звеньев и узловых точек механизма манипулятора. Функция `draw_mapir` на основе значений кодов n_{pr} объемных примитивов строит изображения призм, усеченных пирамид, цилиндров и т. п. в системах O_k . При этом в каждой системе O_k строится единственный объемный примитив. Число объемных примитивов, используемых при задании геометрической модели механизма манипулятора, равно значению параметра nt . Объемный примитив определяется кодом n_{pr} и его геометрическими размерами (табл. 4). Ориентация объемного примитива в системе O_k определяется кодом n_{or} . Параметр n_{or} принимает значения $n_{or} = 1$, $n_{or} = 2$ и $n_{or} = 3$ в случае, если ось примитива l совпадает с осями Ox_k , Oy_k и Oz_k , соответственно.

4. Модуль вычисления элементов МЧПО J . На рис. 5 приведена блок-схема функции `amr`, осуществляющей расчет элементов матриц J_m на основе соотношений табл. 3. Входными данными функции `amr` являются массивы m_{kn} и n_{kod} . Выходными данными — массив a_{dd} . Функция `detj` вычисляет элементы J_m по соотношениям (5), (7) и (9), а функция `detj1`, соответственно, по соотношениям (2)—(4), (6), (8) и (10) (см. табл. 3). На рис. 5 аргументы функций `detj` и `detj1` определяют номерами элементов $m_{\lambda\mu}^{0,k}$ массивов, задающих матрицы $M_{0,k}$ (1). Если код преобразования системы координат будет больше шести, то текущая матрица $M_{0,k}$ не определяет новые элементы J_m МЧПО J .

5. Модуль вычисления значения вектора обобщенных скоростей Q_n . Входными данными функции `girgr` являются массивы

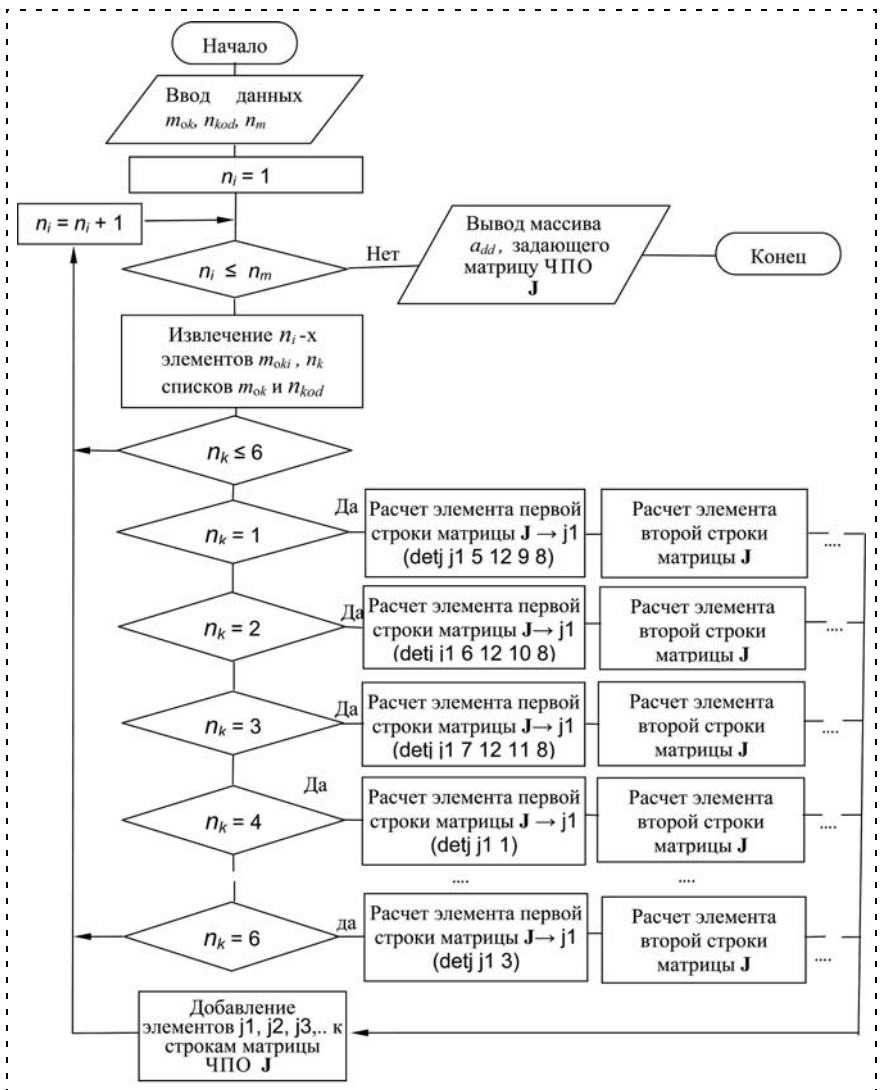


Рис. 5. Блок-схема вычисления элементов J_m матриц J . Функция `amr`

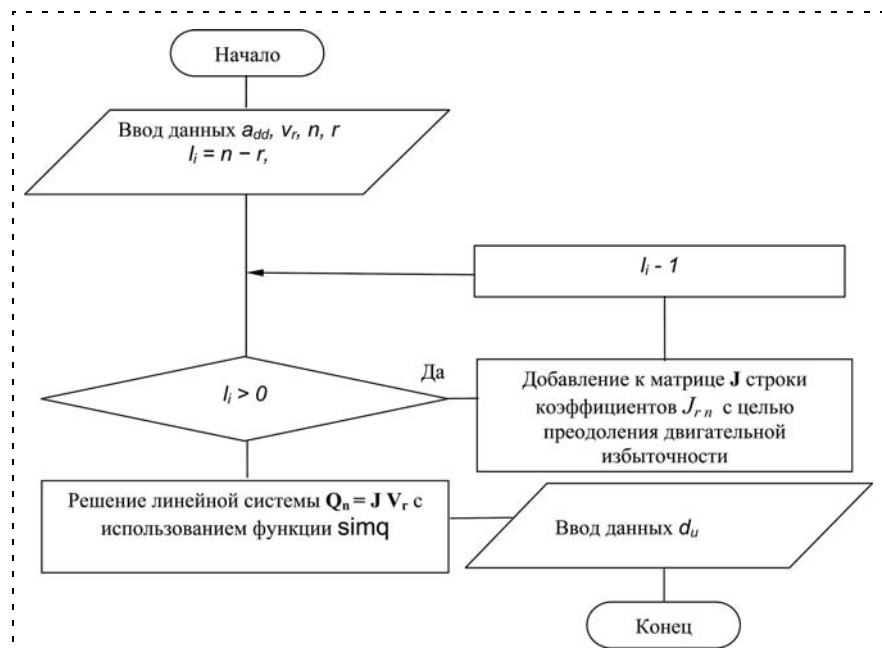


Рис. 6. Блок-схема вычисления вектора Q . Функция `girgr`

Значения массивов u_i , l_{di} , l_{smi} и n_{kod} , определяющих геометрическую модель механизма мобильного манипулятора

№ кинематической пары	Значения массивов для мобильного робота $n_m = 9$; $n = 8$								
	1	2	3	4	5	6	7	—	8
s_j (мм), φ_i , °	S_1 (50)	S_2 (50)	φ_1 (-105)	φ_2 (130)	φ_3 (-110)	φ_4 (90)	φ_5 (135)	—	φ_6 (0)
l_k (мм)	0	0	0	l_1 (940)	l_2 (1850)	l_3 (200)	l_4 (350)	—	l_5 (200)
l_{smi} (мм)	0	0	0	0	0	0	0	l_{sm1} (650)	0
n_{kod}	4	5	3	1	1	3	2	9	3
n_{pr}	—	—	1	1	1	3	3	3	3
n_{or}	—	—	3	2	2	1	3	3	2

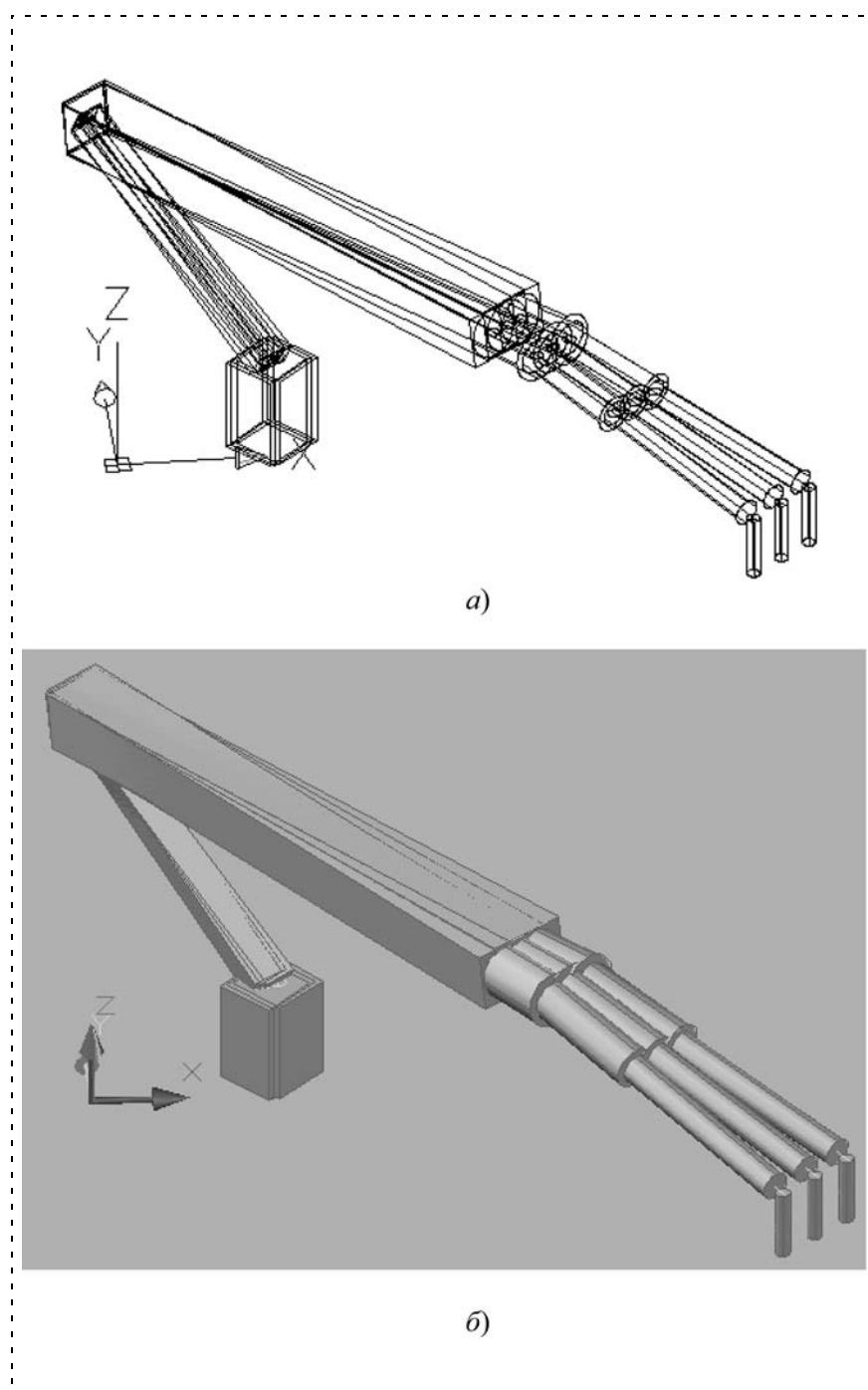


Рис. 7. Изображение объемных примитивов задающих геометрическую модель механизма мобильного робота:

а — каркасная; б — реалистичная

вы a_{dd} и v_r . Массив v_r задает компоненты вектора \mathbf{V}_r . На рис. 6 приведена блок-схема функции `giperg`, позволяющая провести расчет компонентов вектора \mathbf{Q}_n . Выходными данными является массив d_u компонентов вектора \mathbf{Q}_n . Для исключения двигательной избыточности используется функция `plus`. Данная функция на каждом шаге, определяемом параметром $li = n - r$, рассчитывает коэффициенты уравнений, позволяющих исключить двигательную избыточность [3]. Как видно из рис. 6, функция `giperg` использует стандартную функцию `simq`, предназначенную для решения линейной системы уравнений методом Гаусса.

6. Модуль, определяющий пересечение звеньев механизма манипулятора и запретных зон.

В табл. 5 заданы значения списков, определяющие геометрические модели механизмов мобильного робота. Значения длин звеньев механизмов и значения обобщенных координат соответственно задаются в миллиметрах и градусах. Знаки тире задают фиктивные значения, которые необходимы для обеспечения заданной размерности списков. Параметр n_{pr} определяет код объемного примитива, а n_{or} — положение примитива в системе O_k . Значения данных кодов представлены в табл. 4. На рис. 7 представлены изображения объемных примитивов, полученных в соответствии с заданной геометрической моделью механизма мобильного робота (табл. 5).

Заключение

Разработаны универсальные программные модули, позволяющие проводить генерацию моделей и анализ перемещений механизмов роботов по вектору скоростей. Для решения данной задачи введено новое кодированное задание преобразований систем координат, используемых при задании геометрических моделей механизмов роботов. Предложена методика составления массивов, которая позволила определять положение и форму объемных примитивов, задающих подвижные звенья механизмов. Указанные списки дают возможность организовывать циклы при вычислениях матриц, определяющих положения звеньев, МЧПО, расчет пересечений объемных примитивов и запретных зон, а также вычисление вектора обобщенных скоростей.

Одним из преимуществ разработанного нами метода представления геометрических моделей кинематических цепей, в сравнении с известным методом Денавита—Хартенберга, является возможность более точного задания пространственной конфигурации манипуляторов с помощью исполь-

зования большего числа узловых точек и соответственно объемных примитивов. Другим достоинством является разработка универсальных программных модулей, позволяющих проводить виртуальную оценку движений робототехнических систем, имеющих сложную структуру кинематических цепей без ограничений на значения параметров n_m , n и r (при этом $2 \leq r \leq 6$).

Список литературы

1. Кобринский А. А. Манипуляционные системы роботов / А. А. Кобринский, А. Е. Кобринский. М.: Наука, 1985. 344 с.
2. Зенкевич С. Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными робототехническими системами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. М.: МВТУ, 2000. 400 с.
3. Корендяев А. И. Определение числа степеней свободы исполнительного органа промышленного робота / А. И. Корендяев, Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес // Машиноведение. — 1985. — №6. — С. 44—53.
4. Denavit J. Cinematic notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices / J. Denavit, R. S. Hartenberg // J. Appl. Mech. 1955. 77. P. 215—221.
5. Притыкин Ф. Н. Геометрически обоснованные принципы построения адаптивной системы управления мобильного робота функционирующего в сложноорганизованных средах. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 3. С. 31—35.

🌸 Поздравляем юбиляра! 🌸



*Заслуженному деятелю науки и техники РФ,
заместителю заведующего кафедрой Систем автоматического
и интеллектуального управления МАИ(ГТУ),
главному редактору журнала
"Управление и информатика в авиакосмических и морских системах"
в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление",
доктору технических наук, профессору*

Георгию Николаевичу ЛЕБЕДЕВУ,

*известному ученому, специалисту в области теории и практики систем
управления и обработки информации
исполнилось 75 лет.*

Талантливый ученый и преподаватель Г. Н. Лебедев является сопредседателем пользующегося большой популярностью ежегодного международного научно-технического семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации". Высокий профессионализм, широкая эрудиция, большая трудоспособность, чуткость и отзывчивость снискали ему большое уважение учеников и коллег.

*Дорогой Георгий Николаевич!
Поздравляем Вас с юбилеем и желаем Вам крепкого здоровья,
большого счастья, новых творческих успехов!
Редакционный совет, редколлегия и редакция журнала.*

УДК 621.324

А. Г. Басыров, канд. техн. наук, доц.,
Военно-космическая академия

им. А. Ф. Можайского,

Д. М. Лебедев, науч. сотр.,

А. Б. Мастин, науч. сотр.,

Научно-производственная организация "Орион"
basyrov@marvel.ru

Энергосберегающая информационная технология конфигурирования бортовых вычислительных систем космических аппаратов

Рассматривается метод конфигурирования бортовой вычислительной системы космических аппаратов, направленный на повышение энергоэффективности параллельной обработки информации в бортовых комплексах управления. Приведены примеры, иллюстрирующие возможности организации энергосберегающих параллельных вычислительных процессов.

Ключевые слова: вычислительная система, конфигурирование, информационные технологии, энергосбережение

Современные информационные технологии активно внедряются во все сферы космической деятельности, позволяя оптимизировать ресурсоемкость всех этапов космических полетов. Эффективность применения информационно-вычислительных систем для управления орбитальными группировками космических аппаратов (КА) рассматривается сегодня, в том числе и с точки зрения затрат энерго-ресурсов.

В настоящее время энергопотребление становится важным фактором, определяющим выбор аппаратно-программной платформы вычислительных систем для решения требуемых задач. Ведущие производители компьютерного оборудования активно работают над решением проблемы энергоэффективности, увеличивая инвестиции в энергосберегающие технологии, понимая, что пользователей все более интересует производительность вычислительных систем, отнесенная к их энергозатратам. Проблема энергосбережения наиболее актуальна для бортовых вычислительных систем (БВС), функционирующих, как правило, в условиях ограниченных возможностей автономных источников питания.

Традиционный подход к удовлетворению высоких требований по производительности и надежности

современных БВС основан на использовании методов параллельной обработки информации [1]. Аппаратные средства современных вычислительных систем содержат интерфейсы управления энергопотреблением — набор протоколов и технических решений, обеспечивающий гибкое управление минимальным энергопотреблением вычислительной системы. Посредством таких интерфейсов возможно адаптивное управление потреблением энергоресурса через механизм конфигурирования вычислительной системы.

Под *конфигурированием* БВС будем понимать процесс определения некоторой ее конфигурации, обеспечивающей минимизацию потребления энергоресурса при выполнении заданных целевых задач на некотором интервале функционирования БВС с требуемым качеством. *Конфигурацией* БВС назовем некоторое множество основных и резервных вычислительных модулей, входящих в состав БВС и назначенных для выполнения вычислений на заданном интервале ее функционирования.

Модель энергосберегающего функционирования параллельных бортовых вычислительных систем

Архитектура современных БВС включает несколько вычислительных модулей (ВМ), способных функционировать в режиме повышенной надежности (например, на основе резервирования) или в режиме повышенной производительности (в частности, за счет организации параллельной обработки информации). Рассмотрим модель функционирования БВС с параллельной обработкой информации, обеспечивающей минимальную потребляемую мощность в условиях ограничений на требуемую производительность и надежность функционирования БВС.

Значение E энергопотребления БВС от источника питания пропорционально числу одновременно функционирующих ВМ:

$$E \approx \sum_{i=1}^M s_i t_i, \quad (1)$$

где s_i — мощность i -го ВМ; t_i — время работы i -го ВМ; M — число ВМ в БВС.

Отсюда видно, что путь сокращения энергопотребления — сокращение числа, одновременно функционирующих ВМ и (или) времени их активной работы. В режиме повышенной надежности несколько ВМ включаются по схеме резервирования, а число резервных ВМ определяется известными



Схема конфигурации БВС

соотношениями, учитывающими требуемую вероятность безотказной работы БВС.

Рассмотрим возможности минимизации потребляемой мощности БВС, в которой несколько ВМ выполняют параллельную обработку целевых задач, а остальные ВМ обеспечивают горячее или холодное резервирование для обеспечения требуемой надежности функционирования БВС. Разделим множество всех ВМ БВС на три непересекающиеся подмножества, состоящие из v ВМ, выполняющие параллельную обработку целевых задач, w ВМ, находящиеся в горячем резерве, и h ВМ — в холодном резерве (рис. 1). Тогда общее число вычислительных модулей БВС составляет $M = v + w + h$. Будем считать, что энергоресурс потребляют только те ВМ БВС, которые выполняют вычисления или находятся в горячем резерве.

Требуется обеспечить режим функционирования БВС с минимальным энергопотреблением, при котором некоторое число ВМ выполняет обработку целевых задач, обеспечивая требуемую производительность, и минимально необходимое число ВМ находится в горячем резерве, обеспечивая требуемую надежность БВС. Введем следующие обозначения:

M — число ВМ в БВС;

N — число обрабатываемых в БВС целевых задач;

g_i — время, требуемое на обработку i -й задачи

($i = \overline{1, N}$);

P — вероятность безотказной работы каждого ВМ на заданном интервале времени;

P_d — требуемая (директивная) вероятность безотказной работы БВС;

T_d — директивное время завершения обработки всех задач;

U_α^b — отображение множества, состоящего из α задач, на множество, состоящее из b ВМ (это отображение называют планом или расписанием параллельного вычислительного процесса);

$t(U_\alpha^b)$ — время, требуемое на реализацию вычислений по расписанию U_α^b (длина расписания).

Очевидно, что чем больше ВМ будет выделено непосредственно на реализацию вычислений, тем выше будет производительность БВС, что сократит время ее работы и, следовательно, потребляемую резервными ВМ энергию. Однако это может потребовать увеличения числа ВМ, выделенных для резервирования, в целях обеспечения требуемой надежности функционирования БВС, а следовательно, и потребляемой энергии. Таким образом, необходимо

найти компромисс между производительностью и надежностью функционирования БВС для минимизации ее энергопотребления при заданных ограничениях.

Для выполнения требований по надежности функционирования БВС основные ВМ должны резервироваться. Число резервных ВМ определяется числом основных ВМ, вероятностью безотказной работы ВМ на заданном интервале функционирования БВС и требуемой вероятностью безотказной работы БВС. Задача заключается в формировании такого числа основных и резервных ВМ, при котором для решения целевых задач БВС потребуются минимальное количество электроэнергии.

Минимальное время t_{\min} , за которое можно выполнить все целевые задачи с помощью v ВМ, определяется, с одной стороны, требованием выполнения задачи в любой момент времени только одним ВМ, а с другой — максимальной производительностью БВС [2]. Отсюда следует, что

$$t_{\min} = \max \left\{ \frac{1}{v} \sum_{i=1}^N g_i; \max\{g_i\} \right\}. \quad (2)$$

Максимальное время t_{\max} , требуемое для выполнения всех целевых задач (на одном ВМ), равно суммарному времени выполнения всех задач

$$t_{\max} = \sum_{i=1}^N g_i. \quad (3)$$

Очевидно, что при $T_d < t_{\min}$ задача не имеет решения, а при $T_d \geq t_{\max}$ достаточно одного ВМ для реализации вычислений, т. е. $v = 1$. С учетом (2) число v ВМ, выполняющих параллельную обработку целевых задач, должно удовлетворять условию

$$v \geq \left\lceil \frac{1}{T_d} \sum_{i=1}^N g_i \right\rceil, \quad (4)$$

где $\lceil x \rceil$ — ближайшее целое, большее или равное x .

Зная вероятность P безотказной работы на заданном интервале функционирования одного ВМ,

определим вероятность $p(w, M)$ отказа не более чем w из M ВМ БВС:

$$p(w, M) = \sum_{i=0}^w C_M^i (1-P)^i P^{M-i} = \sum_{i=0}^w \frac{M!}{i!(M-i)!} (1-P)^i P^{M-i}. \quad (5)$$

Для выполнения требований по надежности функционирования БВС необходимо выполнить условие

$$\begin{cases} p(w, v+w) \geq P_d; \\ v+w \leq M, \end{cases} \quad (6)$$

т. е. число w ВМ, находящихся в горячем резерве, не может быть меньше числа, обеспечивающего выполнение условия (6).

Пользуясь функцией (5) и условием (6), можно определить зависимость $w = f(v, P, P_d)$ минимально необходимого числа ВМ, которые должны находиться в горячем резерве, для обеспечения выполнения целевых задач с вероятностью не ниже P_d на v ВМ, каждый из которых на заданном временном интервале имеет вероятность безотказной работы P . Для выполнения требований по производительности функционирования БВС должно быть выполнено условие

$$t(U_N^v) \leq T_d, \quad (7)$$

т. е. число v ВМ, выполняющих вычисления, не может быть меньше числа, обеспечивающего реализацию расписания с длиной, отвечающей условию (7). При этом нижняя граница v определяется из соотношения (4), а верхняя определяется из соотношения (6), т. е. $v+w \leq M$.

Потребляемая БВС мощность E складывается из суммарной мощности, потребляемой v ВМ, выполняющими вычисления в течение общего времени

$$t = \sum_{i=1}^N g_i, \text{ и } w \text{ ВМ, находящихся в горячем резерве}$$

в течение времени $t(U_N^v)$:

$$E(v, w) = s \left[\sum_{i=0}^w g_i + wt(U_N^v) \right], \quad (8)$$

где s — мощность, потребляемая одним ВМ БВС.

Таким образом, для определения режима, в котором БВС потребляет минимальную мощность, необходимо найти пару значений (v, w) ВМ, минимизирующих функцию (8) при ограничениях (6) и (7).

Учитывая, что число v основных и число w резервных ВМ связаны соотношением (6), модель функционирования БВС, отражающую ее энергозатраты, на основании (8) можно записать в виде

$$\begin{cases} E(v) = s \left(\sum_{i=1}^N g_i + w(v)t(U_N^v) \right); \\ w(U_N^v) \leq T_d; \\ p(w, v+w) \geq P_d; \\ v+w \leq M. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, задача конфигурирования БВС для энергосберегающей обработки информации сводится к минимизации первого выражения системы (9) при соблюдении условий, определяемых тремя последними выражениями.

Метод конфигурирования бортовых вычислительных систем

В общем виде задача конфигурирования БВС для обеспечения ее энергосберегающего функционирования может быть сформулирована следующим образом.

Дано:

модель энергосберегающего функционирования параллельных БВС.

Требуется:

определить число v ВМ для выполнения параллельной обработки целевых задач и число w ВМ горячего резерва, которые обеспечивают минимальное потребление энергоресурса БВС, т. е. найти такое значение v , при котором $E(v)$, w в выражении (8) принимает наименьшее значение, а также соответствующее расписание U_N^v при ограничениях

$$\begin{cases} t(U_N^v) \leq T_d; \\ v+w \leq M; \\ p(w, v+w) \geq P_d. \end{cases}$$

Ограничение:

- целевые задачи решаются к директивному времени;
- вероятность безотказной работы БВС должна быть не ниже требуемой.

Для решения данной задачи необходимо определить зависимость $t(U_N^v)$, $\forall v \in \overline{1, M-w}$, времени параллельных вычисления от числа основных вычислительных модулей. Это требует преобразования (при необходимости) исходной модели целевой задачи к ярусно-параллельной форме графа [2], имеющей ширину не более, чем v . Это можно сделать, например, построив расписание U_N^v и опре-

делив его длину $t(U_N^v)$ для всех значений v в интервале от $\left[\sum_{i=1}^N g_i/T_d \right]$ до $M - w$.

Очевидно, что минимум функции (8) достигается при минимуме значения $wt(U_N^v)$. Следовательно, при наличии нескольких допустимых конфигураций БВС предпочтение отдается варианту, обеспечивающему минимум функционала $wt(U_N^v)$. Для поиска оптимального решения выражения (8) необходимо рассмотреть все допустимые пары значений v и w . Если число вариантов пар (v, w) , обеспечивающих минимум функционала $wt(U_N^v)$, составляет более одного, то предпочтение можно отдать варианту, при котором обеспечивается наибольшая вероятность безотказной работы БВС, т. е. наибольшее значение функции (5).

Поскольку значение $t(U_N^v)$ аналитически получить невозможно и требуется построение расписания $U_N^v v$, что связано с определенными вычислительными затратами, целесообразно максимально сузить область возможных значений (v, w) для поиска оптимального решения. Здесь можно опираться на следующие рассуждения. Известно, что ускорение, достигаемое при параллельной обработке информации с использованием k ВМ по сравнению с последовательной обработкой, не может быть выше k . Следовательно, для любых двух значений

$v_1 < v_2$ числа ВМ из соотношения $\frac{v_2}{v_1} = k$ вытекает

$$\frac{t(U_N^{v_1})}{t(U_N^{v_2})} \leq k \text{ или } \frac{t(U_N^{v_1})}{t(U_N^{v_2})} \leq \frac{v_2}{v_1}. \text{ Тогда необходимым}$$

условием того, чтобы для любых двух пар чисел $v_1 < v_2$ и $\pi_1 < \pi_2$ было справедливо неравенство $w_2 t(U_N^{v_2}) < w_1 t(U_N^{v_1})$, является выполнение неравенства $\pi_2/\pi_1 < v_2/v_1$.

Следовательно, для поиска минимума функции $y = wt(U_N^v)$ из допустимого множества пар (v_i, w_i) значений числа основных и резервных ВМ путем последовательного сравнения можно исключить те, для которых выполняется условие $w_2 v_1 \geq w_1 v_2$ при $w_2 > w_1$.

Для определения множества допустимых пар значений (v, w) необходимо получить зависимость $w = f(v, P, P_d)$, а для поиска минимума функции

$y = wt(U_N^v)$ среди этих пар целесообразно оставить только те, при которых для любых двух пар (v_1, w_1) , (v_2, w_2) будет справедливо $v_2 > v_1, w_2 > w_1$.

Итоговое множество значений (v, w) может быть получено с помощью следующего алгоритма.

Шаг 1. Определить v из соотношения (2).

Шаг 2. $\pi := 0, Z = 0$.

Шаг 3. Для заданной вероятности P безотказной работы одного ВМ по выражению (3) определить вероятность $p = p(w, w + v)$. Если $p \geq P_d$, то переход на шаг 4, иначе — переход на шаг 6.

Шаг 4. Последовательно просмотреть все пары (v_i, w_i) , входящие в множество Z . Если существует такая пара (v_i, w_i) , что $w/w_i \geq v/v_i$, то переход на шаг 5, иначе включение пары (π, v) в множество $Z: Z = Z \cup (w, v)$.

Шаг 5. Если $v + w < M$, то $v := v + 1$ и переход на шаг 3, иначе — переход на шаг 6.

Шаг 6. $w := w + 1$. Если $v + w < M$, то переход на шаг 3, иначе — переход на шаг 7.

Шаг 7. Конец.

В результате выполнения алгоритма будет сформировано множество $Z = \{(v_i, w_i)\}$, в котором для каждого допустимого значения v числа ВМ, выполняющих обработку целевых задач, будет получено значение w числа ВМ, которые должны находиться в горячем резерве. Максимально возможное число вариантов пар (v, w) составляет $M/2$.

Таким образом, конфигурирование энергосберегающего функционирования БВС включает выполнение следующих основных этапов:

- определение множества альтернативных конфигураций БВС;
- планирование параллельных вычислительных процессов для каждой конфигурации БВС;
- оценивание времени параллельных вычислительных процессов для каждой конфигурации БВС;
- выбор конфигурации, обеспечивающей минимальное потребление энергоресурса при выполнении требований по надежности и оперативности вычислений.

Проиллюстрируем конфигурирование энергосберегающего функционирования БВС в соответствии с рассмотренным методом на нижеследующем примере, приняв для наглядности детерминированный характер модели целевой задачи.

Пример 1.

Дано:

однородная 6-модульная БВС должна выполнить 20 целевых задач со временем выполнения соответственно {4, 8, 12, 6, 4, 4, 2, 10, 12, 6, 14, 10, 8, 12, 2, 10, 14, 16, 10, 12} минут за 90 минут с гарантированной вероятностью 0,99. Вероятность безотказной работы каждого ВМ БВС на интервале функционирования равна 0,96, потребляемая мощность одного ВМ — 50 Вт.

Требуется:

синтезировать план распределения целевых задач по ВМ, обеспечивающий минимальное потребление электроэнергии БВС.

Решение:

1. Из соотношения (2) определяем минимально необходимое число ВМ для выполнения условия оперативности

$$v \geq \left\lceil \frac{1}{T_d} \sum_{i=1}^N g_i \right\rceil = \left\lceil \frac{176}{90} \right\rceil = 2.$$

2. По приведенному ранее алгоритму определяем множество $Z = \{(v_i, w_i)\}$ возможных пар значений основных и резервных ВМ. Это множество будет состоять из единственной пары $(v, w) = (3, 1)$.

Действительно, если для всех $v \in [2, 6]$ из соотношения (3) найти $p(w, v + w)$ при условии $v + w \leq 6$, то все эти значения можно представить в таблице (табл. 1). Пользуясь табл. 1, выделим значения $p(w, v + w)$, удовлетворяющие условию (4), и определим альтернативные варианты конфигураций, т. е. те, которые при равных значениях v соответствуют минимальному значению w .

Обозначив их $w(v, P, P_d)$, найдем $w(3; 0,96; 0,99) = 1$ и $w(4; 0,96; 0,99) = 2$.

3. Построим расписание U_N^v для трех ВМ, определим его длину $\tau(U_{20}^3) = 60$ и, используя выражение (6), найдем энергопотребление БВС для данной конфигурации БВС:

$$E(3, 1) = 10 \cdot (176 + 1 \cdot 60) = 2360 \text{ Вт} \cdot \text{мин} \approx 39,3 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Построим также расписание U_{20}^4 для четырех ВМ, определим его длину — $\tau(U_{20}^4) = 44$ и найдем энергопотребление БВС для этой конфигурации:

$$E(4, 2) = 10 \cdot (176 + 2 \cdot 44) = 2640 \text{ Вт} \cdot \text{мин} = 44 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

В приведенном примере функционирование БВС по варианту с тремя основными и одним резервным ВМ по сравнению с другим возможным вариантом обеспечивает почти 12 % экономии энергии.

Таблица 1

Значения функции $p(w, v + w)$ для примера 1

w	v				
	2	3	4	5	6
0	0,9216	0,884736	0,849347	0,815373	0,782758
1	0,995328	0,990904	0,985242	0,978447	
2	0,99975	0,999398	0,998832		
3	0,99999	0,999964			

Анализ энергоемкости конфигураций БВС

Под энергоемкостью конфигураций БВС будем понимать потребление энергоресурса при функционировании параллельной бортовой вычислительной системы в данной конфигурации. В этом случае показателем качества конфигурирования параллельной БВС в целях ее энергосберегающего функционирования может служить отношение потребляемой мощности при параллельных вычислениях к потребляемой мощности при последовательной (одномодульной) обработке целевых задач

$$q_v = q_v(v, P, P_d, G) = \frac{1 + w_v t(v, G)/T_\Sigma}{1 + w_1}, \quad (10)$$

где w_1 — число резервных ВМ при одномодульной (последовательной) обработке задач; w_v — число резервных ВМ при v -модульной (параллельной) обработке задач; $t(v, G)$ — время параллельных вычислений на v модулях; T_Σ — время вычислительного процесса при последовательной обработке задач; P — вероятность безотказной работы одного ВМ; P_d — требуемая вероятность безотказной работы БВС; G — граф (модель) выполняемых задач.

Назовем этот показатель *коэффициентом энергоемкости конфигурации БВС*.

Так как $\frac{1}{v} \leq t(v, G)/T_\Sigma \leq 1$, то очевиден диапазон значений q_v :

$$\frac{1 + w_v/v}{1 + w_1} \leq q_v \leq \frac{1 + w_v}{1 + w_1}.$$

Снижение потребляемой энергии при параллельных вычислениях имеет место в случае $q_v < 1$. Тогда необходимым условием снижения потребления энергоресурса является выполнение неравенства $w_1 > w_v/v$. Заметим, что при $w_1 = 0$, т. е. в случае *нерезервированного* одномодульного выполнения вычислительного процесса, это неравенство выполняться не будет, что означает естественный вывод о том, что рассматриваемый подход к конфигурированию БВС в целях снижения энергопотребления имеет смысл только для резервированных систем.

При $q_v < 1$ достигается экономия энергоресурса при параллельной обработке информации по сравнению с последовательной на величину

$$\left(\frac{1}{q_v} - 1 \right) \cdot 100 \text{ \%}.$$

Проведем оценивание возможного эффекта при оптимизированной конфигурации энергосберегающего функционирования БВС. Предположим, что целевую задачу можно выполнить как на одном, так и на нескольких ВМ. Сравним энергопотребление БВС при одномодульном и многомодульном

Пример расчета q_v

v	w_v	w_v/v	q_v	Снижение энергопотребления, %
1	1	1	1,00	0
2	1	0,50	0,75	33
3	1	0,33	0,67	50
4	2	0,50	0,75	33
5	2	0,40	0,70	43
6	2	0,33	0,67	50
7	2	0,29	0,64	56
8	2	0,25	0,63	60
9	2	0,22	0,61	64
10	2	0,20	0,60	67
11	3	0,27	0,64	57
12	3	0,25	0,63	60
13	3	0,23	0,61	63

вариантах функционирования БВС. Для этого на основании (10) найдем отношение q_v потребляемой энергии $E(v, w_v)$ БВС при многомодульном функционировании (на v модулях) к потребляемой энергии $E(1, w_1)$ при ее одномодульном функционировании:

$$q_v = \frac{E(v, w_v)}{E(1, w_1)} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i + w_v t(U_N^v)}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i + w_v t(U_N^v)}{\sum_{i=1}^N g_i + w_1 t(U_N^1)} = \frac{\sum_{i=1}^N g_i + w_v t(U_N^v)}{(1 + w_1) \sum_{i=1}^N g_i}$$

Пусть расписание U_N^v вычислительного процесса при v -модульном функционировании БВС не содержит простоев, тогда

$$t(U_N^v) = \frac{\sum_{i=1}^N g_i}{v} \quad \text{и} \quad q_v = \frac{\sum_{i=1}^N g_i + w_v \frac{\sum_{i=1}^N g_i}{v}}{(1 + w_1) \sum_{i=1}^N g_i} = \frac{1 + \frac{w_v}{v}}{1 + w_1}$$

Отсюда показателем качества конфигурирования параллельной БВС по критерию энергопотребления при отсутствии простоев в работе ВМ может служить величина $q_v = \frac{1 + w_v/v}{1 + w_1}$.

В качестве примера рассчитаем значение q для различных вариантов v -модульного функционирования БВС при $P = 0,95$, $P_d = 0,98$ и общем числе ВМ в БВС $M = 16$. Для одномодульного варианта из выражения (3) определим значение вероятности отказа не более чем одного из двух ВМ ($v = 1$, $w_1 = 1$, $v + w_1 = 2$): $p(w, w + v) = p(1, 2) = 0,9975 > P_d$. Тогда в нашем примере $w_1 = f(v, P, P_d) = f(1; 0,95; 0,98) = 1$. В табл. 2 приведены результаты расчета отношения $q_v = (1 + w_v/v)/2$.

Потребление энергии в данном примере при многомодульной организации вычислений по сравнению с одномодульной может быть снижено на величину до 67 %, а оптимальным вариантом организации функционирования БВС следует признать

тот, при котором $y = wt(U_N^v) = \frac{w_v N}{v} \rightarrow \min$, что равносильно $\frac{w_v}{v} \rightarrow \min$. В данном примере опти-

мальной по энергопотреблению является организация вычислений на $v = 10$ основных и $w_{10} = 2$ резервных ВМ.

Таким образом, применение информационных технологий в управлении орбитальными группировками КА может быть с успехом направлено на повышение энергоэффективности вычислительных процессов в БВС КА. Энергопотребление высокопроизводительных бортовых вычислительных систем КА с заданным составом аппаратных средств в значительной мере определяется общим временем функционирования основных и резервных ВМ. Конфигурирование является управляющим воздействием на БВС, которое позволяет минимизировать энергопотребление БВС при выполнении требований по надежности и оперативности параллельной обработки целевых задач.

Сравнительный анализ энергопотребления оптимально сконфигурированных БВС КА свидетельствует о значительном потенциале энергосбережения при параллельной обработке целевых задач. Моделирование энергосберегающего функционирования БВС КА показало, что с помощью предложенного подхода удастся повысить энергоэффективность параллельных вычислительных процессов по сравнению с последовательными вычислениями до 60...70 %.

Список литературы

1. Воеводин В. В., Воеводин В. В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург 2004. 608 с.
2. Барский А. Б. Параллельные информационные технологии: учеб, пособие. М.: Интернет-Университет информационных технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 503 с.

Н. А. Игнатов, аспирант,
МАИ (технический университет)
nick_ignatov@mail.ru

Реализация концепции энергоэффективности в автоматизированных системах управления на основе прогнозирования параметров рынка электрической энергии

Предложена реализация концепции энергоэффективности в автоматизированных системах управления, основанная на прогнозировании параметров нерегулируемого рынка электрической энергии Российской Федерации.

Оптимальное по критерию минимума среднего квадрата ошибки прогнозирование осуществляется с использованием интегрального уравнения Винера, позволяющего рассчитать весовую функцию оптимального экстраполятора, и модели периодически коррелированных случайных процессов.

Ключевые слова: энергоэффективность, прогнозирование, экстраполяция, периодически коррелированный случайный процесс, нерегулируемый рынок электрической энергии

Введение

Либерализация энергетического рынка Российской Федерации одновременно с необходимостью инвестиций в реконструкцию и развитие генерирующего и сетевого оборудования привела в последние годы к значительному росту тарифов на электрическую энергию для конечных потребителей. В связи с этим энергоэффективность становится одним из важнейших аспектов сохранения конкурентоспособности и выживания практически всех отраслей промышленности.

Помимо общей тенденции к росту тарифов цена электрической энергии на нерегулируемом рынке непрерывно изменяется во времени; изменение это связано, в первую очередь, с балансом спроса и предложения — когда загрузка генерирующих мощностей велика, цена, очевидно, растет, когда загрузка мала — цена падает.

Одним из важнейших аспектов энергоэффективности является эффективность использования генерирующих мощностей. Чем ближе потребление электрической энергии к постоянной величине, тем ближе к постоянной величине коэффициент загрузки генерирующих мощностей и тем выше эффективность их использования.

Равномерность потребления электрической энергии может быть обеспечена, если потребители электрической энергии будут стремиться оптимизировать свой режим потребления, покупая электрическую энергию в моменты наименьшей загрузки энергосистемы, т. е. в моменты, когда цена электри-

ческой энергии на нерегулируемом рынке достигает минимумов.

Разработка и реализация в автоматизированных системах управления верхнего уровня производством, предприятием или группой предприятий подсистемы прогнозирования цены электрической энергии на нерегулируемом рынке дают возможность как промышленным, так и прочим потребителям повышать экономическую и энергетическую эффективность как своей работы, так и процесса функционирования генерирующих мощностей. Это обеспечивается за счет оперативной коррекции собственного режима потребления в зависимости от нового входного фактора — предполагаемой (прогнозируемой) цены электрической энергии.

Нерегулируемый рынок электрической энергии Российской Федерации

С 1 сентября 2006 г. Постановлением правительства Российской Федерации введены новые правила функционирования оптового рынка электроэнергии [1].

На оптовом рынке поставщиками электроэнергии являются генерирующие компании и импортеры электроэнергии. В роли покупателей выступают:

- потребители, покупающие электроэнергию для удовлетворения собственных производственных нужд;
- сбытовые компании, приобретающие электроэнергию в целях дальнейшей перепродажи конечным потребителям и действующие от своего имени;
- экспортеры (операторы экспорта) электроэнергии — организации, осуществляющие деятельность по покупке электрической энергии с отечественного оптового рынка в целях экспорта в зарубежные энергосистемы.

Согласно правилам с 1 января 2011 г. электрическая энергия в полном объеме должна поставляться по свободным (нерегулируемым) ценам. Механизм поставки — так называемый рынок "на сутки вперед". Основой рынка "на сутки вперед" является проводимый компанией — системным оператором — конкурентный отбор ценовых заявок поставщиков и покупателей за сутки до реальной поставки электроэнергии с определением цен и объемов поставки на каждый час суток.

Существенно, что результаты такого аукциона ценовых заявок являются основой для планирования системным оператором режимов производства и потребления электроэнергии — загружаются, в первую очередь, наиболее экономически эффективные генерирующие мощности и в соответствии с правилами торговли, в первую очередь, удовлетворяются заявки на поставку электроэнергии с наименьшей ценой.

Цена одного киловатт-часа электрической энергии на нерегулируемом рынке как случайная функция времени, очевидно, является случайным процессом, значительно подверженным влиянию сезонных (недельных, месячных и годовых) случайных факторов.

Сезонные временные ряды

Прогнозирование временного ряда общего вида основано на его декомпозиции на трендовую, сезонную и случайную компоненты. Выбор и применение какой-либо из известных в настоящее время математических моделей прогнозирования связаны, в первую очередь, с определением степени статистической значимости каждой из данных компонент (доли дисперсии компоненты в дисперсии временного ряда) и степени ее регулярности (параметры регулярных компонент меняются сравнительно медленно, закон их изменения известен или возможно получение его достоверной оценки).

Для определенных временных рядов наибольшую статистическую значимость могут иметь регулярные сезонные компоненты.

Трендовая компонента в таких рядах, как правило, имеет постоянные либо сравнительно медленно меняющиеся параметры, проблем с построением ее модели, оценкой параметров и прогнозированием, как правило, не возникает, случайная же компонента либо имеет малую статистическую значимость, либо носит периодический характер, аналогичный сезонной.

Почасовые объемы выработки электрической и тепловой энергии объектами генерации (как для отдельных объектов генерации, так и для региональных рынков) и, как следствие, цена 1 кВт·ч электрической энергии на нерегулируемом рынке Российской Федерации являются временными рядами такого типа.

Теория случайных процессов классифицирует такие временные ряды как реализации квазистационарных случайных процессов с регулярными стохастическими периодическими компонентами.

Прогнозирование квазистационарных случайных процессов с регулярными стохастическими периодическими компонентами целесообразно осуществлять посредством математических моделей, позволяющих учесть эти периодические компоненты в явном виде.

Предположим, что исходные данные для прогнозирования представляют собой реализацию исследуемого случайного процесса $X(t)$, заданную с некоторым интервалом дискретизации:

$$\tilde{X}(t_k), k = 0, \dots, N, t_{k+1} - t_k = \Delta, \quad (1)$$

причем интервал дискретизации, очевидно, должен быть меньше предполагаемого интервала сезонности T и должен позволять отследить сезонные закономерности.

Объем исходных данных при этом должен позволять исследовать, как минимум, несколько периодов сезонности (по аналогии с исследованием обычного эргодического случайного процесса, когда исходная выборка должна быть, по крайней мере, в несколько раз больше, чем период затухания его автокорреляционной функции [2]).

Прогнозирование на основе модели периодически коррелированных случайных процессов

Предлагаемый в данной статье метод прогнозирования цен на нерегулируемом рынке электрической энергии как реализации квазистационарных случайных процессов с регулярными стохастическими периодическими компонентами основан на статистической модели периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) [3], представляющих собой частный случай периодически нестационарных в широком смысле слова случайных процессов. Такая модель процесса предполагает, что для его автокорреляционной функции выполняется следующее условие:

$$K_X(t_1 + T, t_2 + T) = K_X(t_1, t_2). \quad (2)$$

Одним из свойств ПКСП, в общем, очевидно вытекающих из (2), является то, что последовательность

$$\xi(t_0, k) = X(t_0 + kT), 0 \leq t_0 < T, k = 0, \dots, \quad (3)$$

т. е. последовательность отсчетов его значений относительно некоторого начального значения $t_0 \in [0, T)$ с интервалом, равным периоду его автокорреляционной функции, является эргодической [3].

Из этого следует, что оценку автокорреляционной функции случайного процесса при рассмотрении его как периодически коррелированного можно получить по одной продолжительной реализации, несмотря на то, что с точки зрения классической теории он является нестационарным.

Автокорреляционная функция случайного процесса определяется, как известно, соотношением

$$K_X(t_1, t_2) = M[(X(t_1) - m_X(t_1))(X(t_2) - m_X(t_2))] = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - m_X(t_1))(x_2 - m_X(t_2))f(x_1, x_2, t_1, t_2)dx_1dx_2.$$

Учитывая приведенное выше определение автокорреляционной функции, свойство (2) и эргодичность последовательности (3), можно получить следующее выражение для определения автокорреляционной функции ПКСП путем усреднения по времени любой его продолжительной реализации

$x(t)$ с учетом интервала периодичности T его автокорреляционной функции:

$$K_X(t_1, t_2) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{2K} \sum_{k=-K}^K (x(t_1 + kT) - m_X(t_1 + kT))(x(t_2 + kT) - m_X(t_2 + kT)). \quad (4)$$

Формула оценки с учетом (1) и (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_X(i\Delta, j\Delta) &= \\ &= \frac{\sum_{k=0}^{k_{\max}} (\tilde{X}(i\Delta + kT) - \tilde{m}_X(i\Delta + kT))(\tilde{X}(j\Delta + kT) - \tilde{m}_X(j\Delta + kT))}{k_{\max}}; \\ k_{\max} &= \left[\frac{(N - \max(i, j))\Delta}{T} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Предлагаемый метод предполагает формализацию задачи прогнозирования случайного процесса по критерию минимума среднего квадрата ошибки в виде задачи поиска оптимального по критерию минимума среднего квадрата ошибки оператора (в нашем случае прогнозирующего), которая является одной из наиболее распространенных среди задач статистической оптимизации систем управления.

Оптимальным оператором в классическом понимании называется такой оператор, который обеспечивает экстремальное значение некоторого критерия качества функционирования системы, на вход которой поступает известный случайный процесс $X(t)$.

Постановка задачи прогнозирования [2, 4] предполагает, что на выходе этой системы требуется получить заданный требуемый выходной сигнал $X(t + \gamma)$, равный спрогнозированному на интервал γ входному сигналу, в то время как на самом деле система формирует некий реальный выходной сигнал $Y(t)$. Разность идеального и реального выходного сигналов, очевидно, возникает вследствие невозможности точно предсказать будущее процесса.

Ошибка прогнозирования определяется в этом случае соотношением

$$E(t) = Y(t) - X(t + \gamma).$$

В качестве характеристики процесса $E(t)$ и критерия качества функционирования системы выбран средний квадрат ошибки:

$$Q(t) = M[E^2(t)] = M[(Y(t) - X(t + \gamma))^2]. \quad (6)$$

Критерий $Q(t)$ является квадратичной функцией, что позволяет минимизировать его аналитически.

Пусть на вход оптимизируемой системы на интервале $[t_0, t]$ поступает скалярный случайный процесс — сигнал $X(t)$ с известными статистическими характеристиками. Реализуя некоторое преобразование A входного сигнала, система формирует выходной сигнал $Y(t) = A\{X(t)\}$. Решая задачу поиска оптимального преобразования A , обеспечивающего

минимум критерия Q , методами вариационного исчисления (решение подробно рассматривается в [2]), можно получить общее условие оптимальности:

$$A\{X(t)\} = M[X(t + \gamma)/x(\tau)], \quad \tau \in [t_0, t]. \quad (7)$$

Это соотношение показывает, что оптимальное преобразование есть условное математическое ожидание вектора требуемого выходного сигнала $X(t + \gamma)$ при условии наблюдения на интервале $[t_0, t]$ некоторой реализации $x(\tau)$ входного сигнала $X(t)$.

Ограничивая процесс поиска оптимального по условию (7) оператора классом линейных, физически реализуемых, нестационарных операторов и учитывая, что в этом случае

$$Y(t) = A\{X(t)\} = \int_{t_0}^t a(t, \tau)X(\tau)d\tau, \quad (8)$$

где $a(t, \tau)$ — импульсная весовая функция оптимальной системы, из необходимого и достаточного условия минимума критерия Q можно вывести интегральное уравнение Винера—Колмогорова для оптимального по критерию минимума (6) прогнозирующего устройства (экстраполятора) на интервал прогнозирования γ :

$$\int_{t_0}^t \alpha(t, t_2)K_X(t_2, t_1)dt_2 = K_X(t + \gamma, t_1), \quad t_0 \leq t_1 \leq t, \quad (9)$$

причем неоднородную компоненту в уравнении можно не учитывать в силу того, что модель периодически коррелированных процессов предлагается использовать только для прогноза сезонной компоненты временного ряда, представляющей собой центрированный случайный процесс.

Подстановка в уравнение (9) автокорреляционной функции случайного процесса в виде автокорреляционной функции периодически коррелированного случайного процесса (2) позволяет получить импульсную весовую функцию оптимальной прогнозирующей линейной системы, учитывающую наличие в прогнозируемом случайном процессе $X(t)$ регулярных стохастических периодических компонент.

Дискретизируя выражение (8) с учетом (1), получаем уравнение оптимального по критерию минимума среднего квадрата ошибки прогноза процесса $X(t)$ из точки с индексом i на интервал γ с помощью линейного экстраполятора, учитывающего $n + 1$ значение известной реализации процесса:

$$Y(t_i) = \sum_{k=0}^n \alpha_k(\gamma)\tilde{X}(t_i - k), \quad (10)$$

где коэффициенты $\alpha_k(\gamma)$ определяются из системы линейных уравнений, которую можно записать,

дискретизируя уравнение (9) с учетом соотношений (1) и (10)

$$\sum_{k=0}^n \alpha_k(\gamma) K_X(t_k, t_1) = K_X\left(t_i + \frac{\gamma}{\Delta}, t_1\right), 0 \leq 1 \leq n. \quad (11)$$

Учет регулярных стохастических периодических компонент при прогнозировании случайного процесса $X(t)$ с помощью соотношений (10) и (11) обеспечивается расчетом оценки автокорреляционной функции прогнозируемого процесса по формуле (5).

Сезонная модель АРПСС

Одной из наиболее распространенных и эффективных современных моделей для прогнозирования сезонных временных рядов является сезонная модель АРПСС (Season ARIMA, SARIMA) [4, 5, 6].

Формально уравнение прогноза процесса $X(t)$ на интервал, кратный интервалу сезонности T , посредством авторегрессионной компоненты сезонной модели АРПСС можно записать следующим образом:

$$X_{\Pi}(t_i) = \sum_{k=0}^n \alpha_k X(t_{i-kT}), \quad (12)$$

где коэффициенты регрессии α_k определяются методом наименьших квадратов исходя из минимума среднего квадрата ошибки прогнозирования, либо с помощью известных соотношений [4, 5] (например, уравнения Юла—Уолкера или методом максимального правдоподобия).

Сравнение предлагаемого метода и сезонной модели АРПСС

Можно показать, что предлагаемый метод и сезонная модель АРПСС эквивалентны с точки зрения теоретического значения критерия $Q(t)$ для процесса с любой произвольной автокорреляционной функцией [2, 5]. При решении реальных задач значения оценки критерия $Q(t)$ будут отличаться от теоретических в силу ограниченности интервала, на котором наблюдается реализация прогнозируемого процесса, и в силу того, что процесс является квазистационарным.

Сравнивая соотношения (10) и (12), можно заметить, что сезонная модель АРПСС предполагает стационарность связи между сечениями процесса, отстоящими от точки, из которой осуществляется прогнозирование, на интервалы, кратные интервалу сезонности. При этом статистические связи между другими сечениями процесса не учитываются. Это происходит вследствие того, что сезонная модель АРПСС использует операцию взятия разности с лагом, равным интервалу сезонности [6], что, фактически, означает отбрасывание значительной

части исходных данных непосредственно при прогнозировании.

Предлагаемый метод, напротив, учитывает статистические связи между всеми доступными для исследования сечениями прогнозируемого процесса, что при решении реальных задач приводит к снижению ошибки прогнозирования по сравнению с ошибкой прогнозирования сезонной модели АРПСС.

Исходные данные для анализа и прогнозирования

Линейный оптимальный экстраполятор, построенный в соответствии с соотношениями (5), (10) и (11), а также сезонная модель АРПСС реализованы в программном комплексе, разработанном на языке Object Pascal.

Исходными данными для анализа и прогнозирования выступают реализации случайных процессов — цен 1 кВт·ч на нерегулируемом рынке электрической энергии сбытовых компаний ОАО "Мосэнергосбыт" — $X_1(t)$, ОАО "Вологодская сбытовая компания" — $X_2(t)$, ОАО "ЧелябЭнергоСбыт" — $X_3(t)$, ОАО "КрасноярскЭнергоСбыт" — $X_4(t)$, представленных выборками объемом 10 968 значений каждая, что соответствует торговому периоду с июля 2008 г. по октябрь 2009 г. с интервалом дискретизации, равным 1 ч.

Интервал дискретизации выборки соответствует интервалу дискретизации, с которым работает оператор нерегулируемого рынка.

Графики, демонстрирующие участки реализаций, по которым можно качественно оценить характер и поведение данных случайных процессов, приведены на рис. 1.

Качественно данные процессы можно охарактеризовать как квазистационарные случайные процессы с постоянным математическим ожиданием. Помимо этого на графиках реализаций трех процессов из четырех ($X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$) видно существенное влияние периодических факторов, т. е. в данных случайных процессах присутствует так называемая сезонная компонента. Характер этой сезонной компоненты может быть как детерминированным, так и стохастическим, тем не менее, с точки зрения отдельно взятого потребителя электрической энергии, данная сезонная компонента, скорее, является стохастической, так как точное значение цены в будущем потребитель предсказать не может.

На четвертом графике ($X_4(t)$) присутствие такой периодической компоненты визуально не подтверждается, следовательно, в общем случае физический характер случайного процесса — цены 1 кВт·ч на нерегулируемом рынке — далеко не всегда подвержен регулярному существенному влиянию периодических факторов, и в любом случае его прогнозированию в отдельно взятом регионе всегда должен предшествовать фундаментальный статистический анализ.

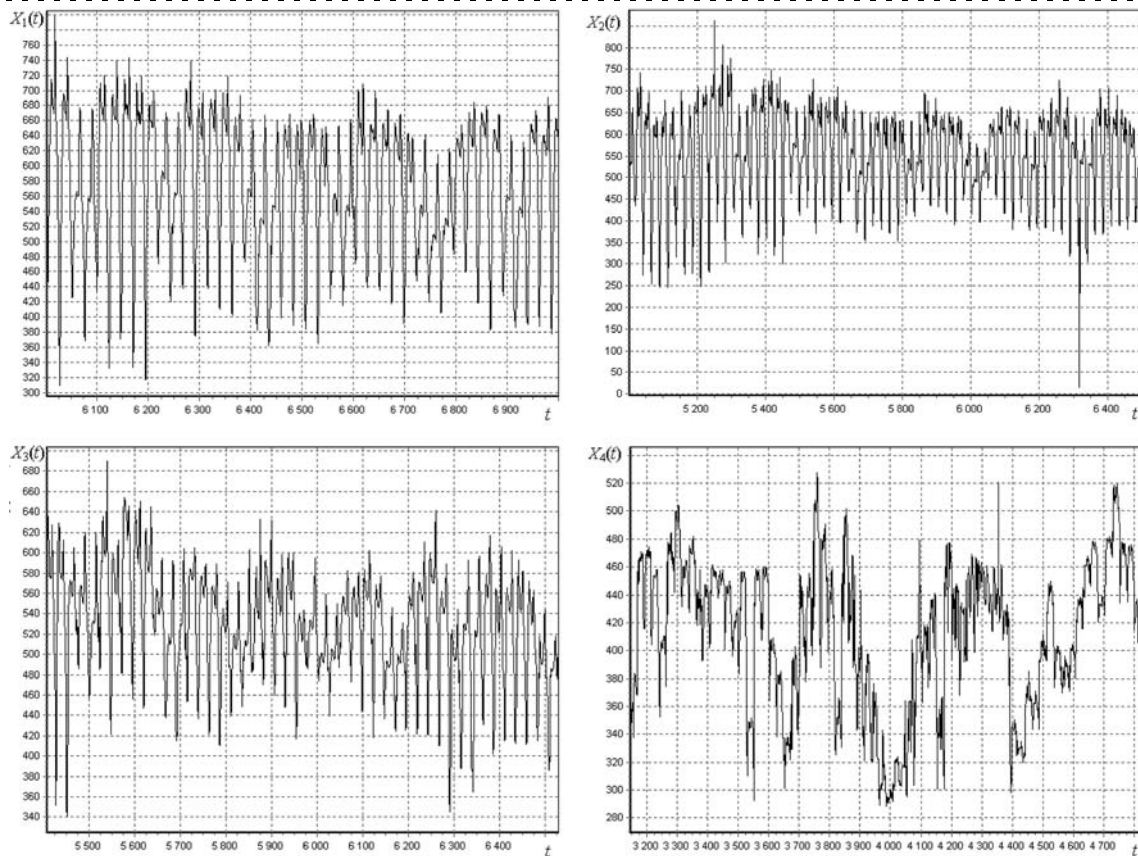


Рис. 1. Графики реализаций случайных процессов — цен 1 кВт · ч на нерегулируемом рынке электрической энергии некоторых сбытовых компаний

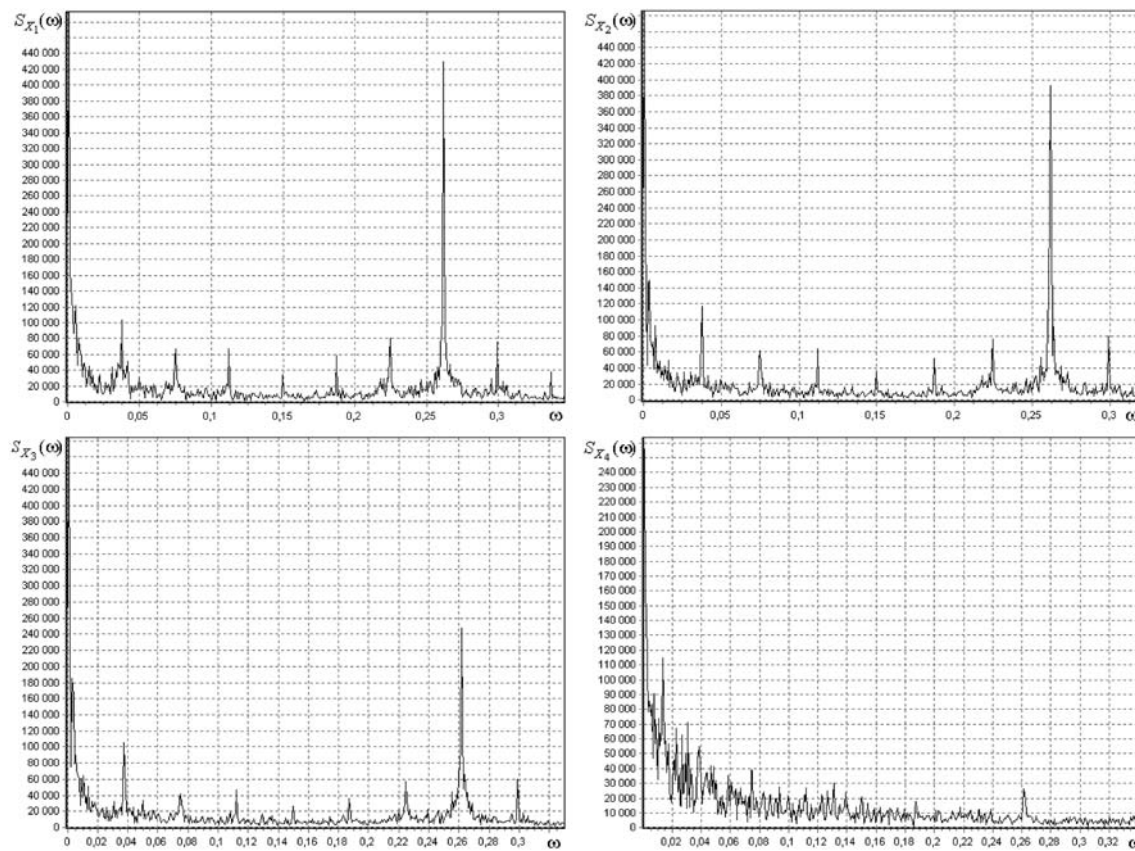


Рис. 2. Графики оценок спектральных плотностей рассматриваемых случайных процессов

Анализ исходных данных

Исследовать периодические закономерности, как известно, целесообразно в частотной области. На рис. 2 приведены оценки спектральных плотностей исследуемых случайных процессов, полученные периодограммным методом [6].

Спектральный анализ подтверждает сделанные выше на основе результатов качественного анализа предположения о наличии регулярных периодических компонент в трех процессах из четырех (ОАО "Вологодская сбытовая компания", ОАО "Мосэнергосбыт", ОАО "ЧелябЭнергоСбыт"). Локальные максимумы на частотах 0,00872; 0,0374; 0,2618 (которым соответствуют периоды 720, 168 и 24 ч) говорят о наличии регулярных суточных, недельных и месячных сезонных компонент случайного процесса.

Вместе с тем, подтверждается отсутствие периодических компонент в четвертом процессе (ОАО "КрасноярскЭнергоСбыт"), который со статистической точки зрения более всего напоминает экспоненциальный шум (небольшой максимум в области периода 24 ч не является статистически значимым в масштабе общей дисперсии данного процесса), поэтому в дальнейшем исключим данный процесс из данного исследования.

Вопрос выбора интервала сезонности T как параметра ПКСП решается однозначно в случае, когда спектральная плотность имеет один ярко выраженный максимум.

Если таких максимумов несколько, то величину T целесообразно соотносить с интервалом прогнозирования γ — если $\gamma \gg T$ (интервал прогнозирования значительно превосходит интервал периодичности автокорреляционной функции ПКСП), влияние компонент с периодом T на интервале γ при прогнозировании может быть не столь существенным, что ставит вопрос о необходимости их учета в принципе.

В обратном же случае, когда $\gamma \ll T$, необходимо соотносить T с объемом исходных данных с учетом рекомендаций, которые были даны ранее.

Обоснование возможности применения модели ПКСП для анализа и прогнозирования случайного процесса фактически заключается в проверке выполнения свойства (3) — если оно выполняется, то выполняется и условие (2), следовательно, автокорреляционную функцию такого процесса можно определить выражением (4) и использовать формулу (5) для ее оценки.

Проверка свойства (3) по достаточному условию эргодичности [2] показала, что оно выполняется для процессов $X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$ при $T = 24$ ч, $T = 168$ ч, $T = 720$ ч и не выполняется для процесса $X_4(t)$.

Моделирование процесса прогнозирования

В целях сравнения эффективности предлагаемого метода прогнозирования на основе модели периодически коррелированных случайных процессов с сезонной моделью АРПСС проведено моделирование процесса прогнозирования для трех рассматриваемых случайных процессов.

Моделирование процесса прогнозирования осуществлялось по следующему известному алгоритму [7]:

- оценка статистических характеристик процесса (постоянное математическое ожидание и автокорреляционная функция ПКСП) для каждой текущей точки (точки, из которой осуществлялось прогнозирование на текущем шаге) на предшествующем ей интервале;
- прогнозирование на интервал γ (1 ч и 24 ч) вперед;
- расчет значений ошибки;
- выбор в качестве текущей точки, следующей после текущей.

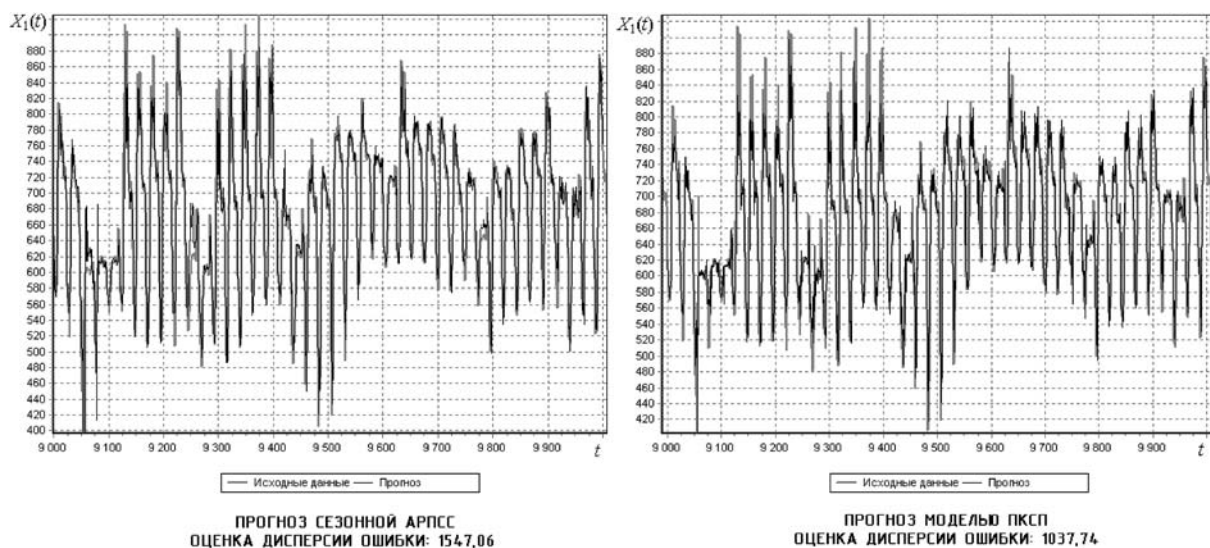


Рис. 3. Краткосрочное прогнозирование процесса $X_1(t)$ сезонной моделью АРПСС и моделью ПКСП

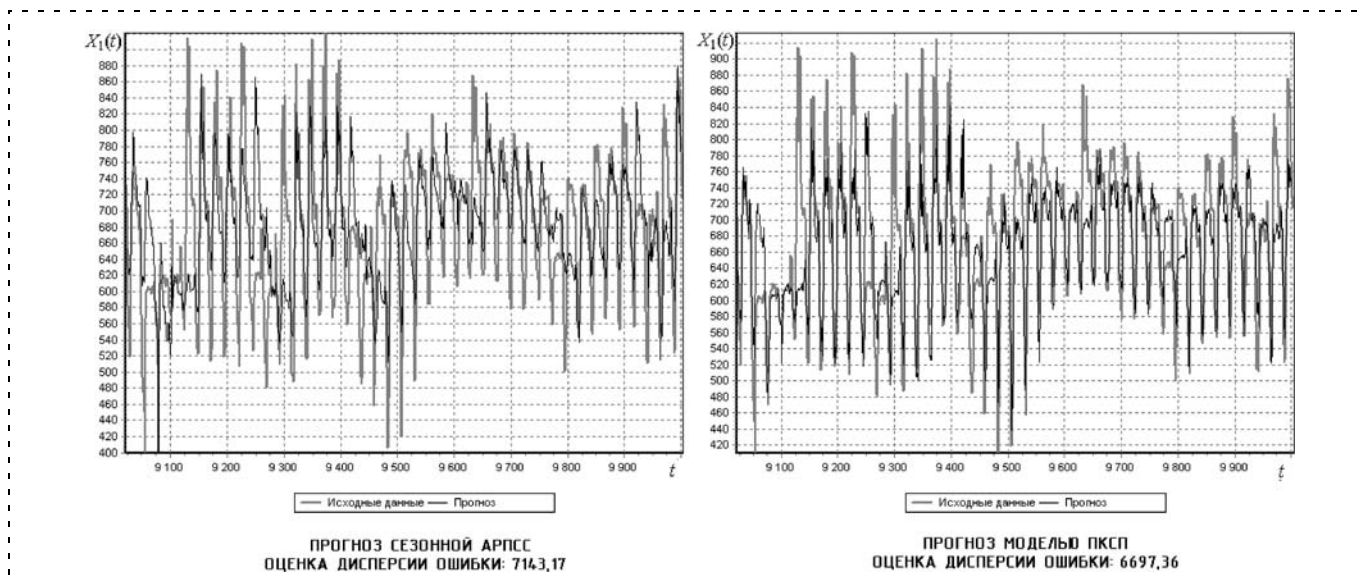


Рис. 4. Среднесрочное прогнозирование процесса $X_1(t)$ сезонной моделью АРПС и моделью ПКСП

Результаты сравнения модели ПКСП и сезонной АРПС

Тест	Сезонная АРПС		Модель ПКСП		Уменьшение дисперсии ошибки модели ПКСП относительно сезонной АРПС
	Оценка МО ошибки	Оценка дисперсии ошибки	Оценка МО ошибки	Оценка дисперсии ошибки	
Прогнозирование цены электрической энергии на нерегулируемом рынке в течение 1000 календарных суток					
Краткосрочное прогнозирование на интервал 1 ч					
ОАО "МосЭнергоСбыт"	0,31	1547,06	1,12	1037,74	32,92 %
ОАО "Вологодская сбытовая компания"	3,16	1426,95	2,30	1258,99	11,77 %
ОАО "ЧелябЭнергоСбыт"	0,89	976,94	0,76	834,75	14,55 %
Среднесрочное прогнозирование на интервал 1 сутки					
ОАО "МосЭнергоСбыт"	15,12	7143,17	1,62	6697,36	6,24 %
ОАО "Вологодская сбытовая компания"	-6,97	5114,13	-2,71	4580,49	10,43 %
ОАО "ЧелябЭнергоСбыт"	-5,49	2697,62	-0,84	2488,92	7,74 %

Алгоритм, очевидно, является итерационным и повторяется до тех пор, пока не будут получены значения ошибки для всех точек на заданном интервале моделирования. После завершения работы алгоритма оценивались статистические характеристики ошибки прогнозирования — математическое ожидание и дисперсия.

Дополнительно осуществлялась регуляризация полученной модели по критерию регулярности [7] — оценке среднего квадрата ошибки прогнозирования в зависимости от величины интервала, на котором осуществлялась оценка параметров модели.

Значение интервала сезонности T как параметра ПКСП выбиралось исходя из рекомендаций, данных ранее, и равнялось 24 ч.

Графики, показывающие результаты моделирования процесса краткосрочного (на 1 ч) прогнозирования процесса $X_1(t)$ моделью периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) и сезонной моделью АРПС приведены на рис. 3, среднесрочного (на 24 ч) прогнозирования — на рис. 4.

Окончательные результаты сравнения модели ПКСП и сезонной АРПС на основе статистических характеристик ошибок прогнозирования для трех исследуемых случайных процессов приведены в таблице.

Результаты сравнения показывают, что использование модели периодически коррелированных случайных процессов в среднем обеспечивает меньший средний квадрат ошибки прогнозирования, чем сезонная модель АРПС.

Заключение

Предложенная реализация концепции энергоэффективности в автоматизированных системах управления заключается в разработке, реализации и интеграции подсистемы прогнозирования параметров нерегулируемого рынка электрической энергии в автоматизированных системах управления верхнего уровня производством, предприятием или группой предприятий.

Исследование предложенного решения задачи автоматизации прогнозирования цены электрической энергии на нерегулируемом рынке позволяет сделать вывод об эффективности его применения потребителями—участниками нерегулируемого рынка для прогнозирования цены электрической энергии, оптимизации затрат на приобретение требуемых ее объемов и, как следствие, повышения экономической и энергетической эффективности как своей работы, так и процесса функционирования генерирующих мощностей.

Список литературы

1. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 31 августа 2006 г. № 529. г. Москва "О совершенствовании по-

рядка функционирования оптового рынка электрической энергии (мощности)".

2. **Росин М. Ф., Булыгин В. С.** Статистическая динамика и теория эффективности систем управления. М.: Машиностроение, 1981.

3. **Драган Я. П.** Периодические и периодически нестационарные случайные процессы // Отбор и передача информации. Киев: Наук. думка, 1985. Вып. 72. С. 3—17.

4. **Цыплаков А. А.** Введение в прогнозирование в классических моделях временных рядов // Квантиль. 2006. № 1. С. 3—19.

5. **Бокс Д. Ж., Дженкинс Г.** Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир. 1974.

6. **Боровиков В. П., Ивченко Г. И.** Прогнозирование в системе STATISTICA в среде WINDOWS. М.: ФИНАНСЫ И СТАТИСТИКА, 2006.

7. **Ивахненко А. Г.** Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. К.: Техніка, 1975.

УДК 658.012.011.56:658.264

Д. В. Лукьянов, аспирант,
Саратовский государственный
технический университет,

В. А. Иващенко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Институт проблем точной механики
и управления РАН, г. Саратов
iptmuran@san.ru

Реконфигурация структур электрических сетей при нарушениях электрообеспечения промышленных предприятий

Поставлена задача реконфигурации структур электрических сетей при нарушениях электрообеспечения промышленных предприятий, вызванных дефицитом мощности в электроэнергетической системе и авариями в системе электрообеспечения предприятий. Рассмотрены известные методы и алгоритмы ее решения.

Предложен эвристический алгоритм решения задачи, обеспечивающий оперативное восстановление электрообеспечения предприятий.

Ключевые слова: реконфигурация структур электрических сетей промышленных предприятий, методы и алгоритмы восстановления электрообеспечения предприятий

Введение

Резервирующие элементы электрических сетей промышленных предприятий, повышая надежность сетей, существенно усложняют их топологию. Число возможных вариантов схем электропитания потребителей может достигать нескольких тысяч. Поэтому оперативная реконфигурация структур электрических сетей при нарушениях электрообеспечения промышленных предприятий является актуальной

задачей управления транспортом и распределением электроэнергии на них [1].

Постановка задачи

Электрические сети промышленных предприятий представляют собой сложные структуры, включающие в свой состав большое число разнородных взаимосвязанных элементов (рис. 1).

Как следует из рис. 1, в структуре электросети выделяется $k = \overline{1, 4}$ уровней иерархии: высоковольтные вводы электроэнергии в предприятие ВЛ₁, ..., ВЛ_{m1}; комплектные трансформаторные подстанции КТП₁, ..., КТП_{m2}; силовые трансформаторы Т₁, ..., Т_{m22}; группы приемников электроэнергии ПЭ₁, ..., ПЭ_{m5}, получающих электроэнергию от одной секции распределительных шин РС₁, ..., РС_{m3}; группы приемников электроэнергии, питающиеся от одного низковольтного фидера КЛ₁, ..., КЛ_{m4}.

Для решения задачи вводится фиктивная вершина (исток) v , объединяющая высоковольтные вводы электроэнергии в предприятие ВЛ₁, ..., ВЛ_{m1}. В качестве пропускных способностей p_{i1} , $i = \overline{1, m_1}$, фиктивных ветвей (дуг), соединяющих вводы электроэнергии с истоком, выступают максимально возможные мощности $P_{i1}(t)$, потребляемые с вводов.

Аналогично вводится фиктивная вершина (приемник электроэнергии, сток) w , объединяющая низковольтные фидеры КЛ₁, ..., КЛ_{m4}. В качестве пропускных способностей p_{i4} , $i = \overline{1, m_4}$, фиктивных дуг, соединяющих фидеры со стоком, в этом случае принимаются максимально возможные мощности $P_{i4}(t)$, потребляемые с них.

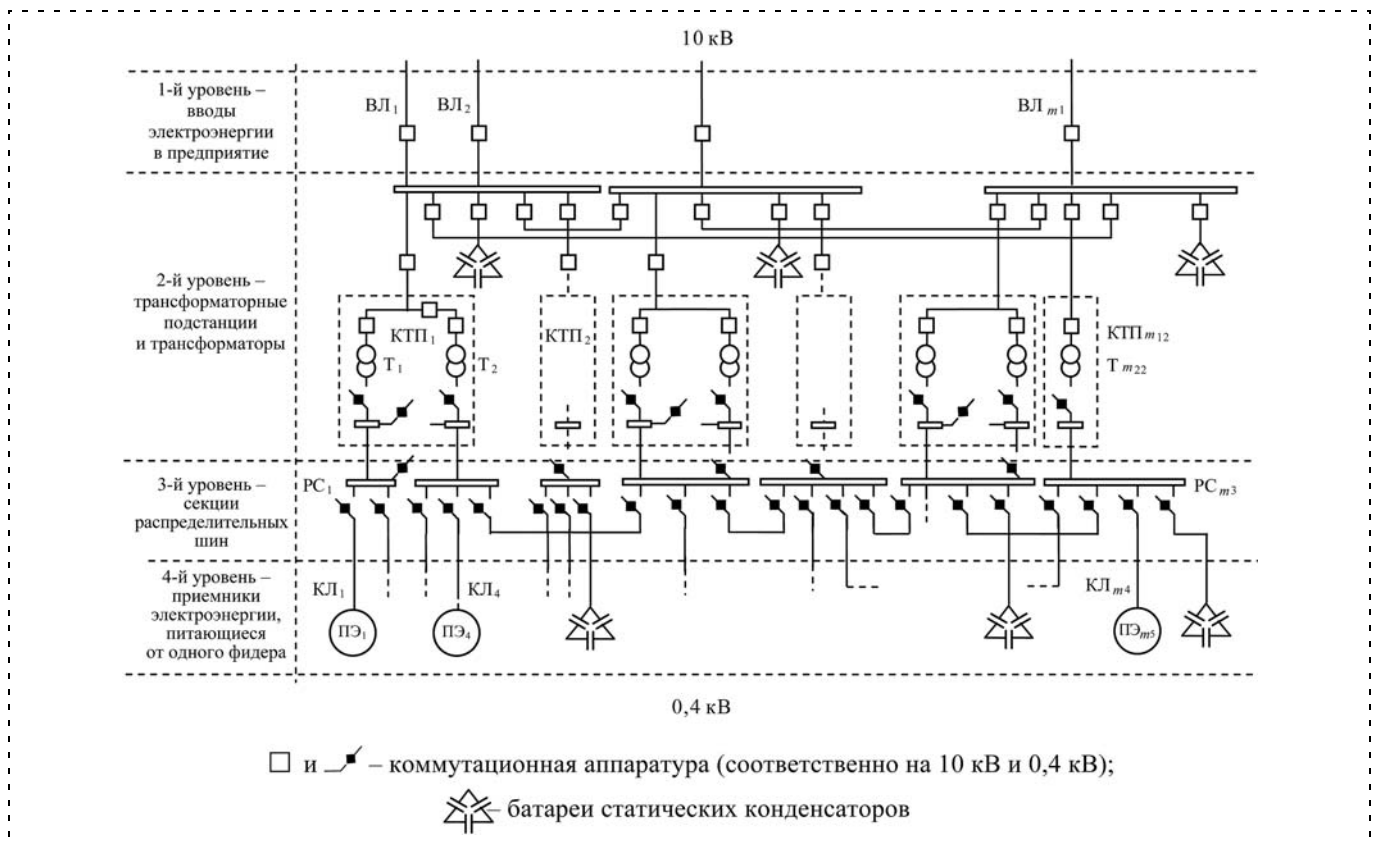


Рис. 1. Электрическая сеть промышленного предприятия

Математическая постановка задачи имеет вид [2]

$$\begin{aligned}
 &F \rightarrow \max; \\
 &F = \sum_{i \in G} P_{vi}, \quad \sum_{i \in G} (-P_{iw}) = -F; \\
 &\forall i, s \in G \quad \sum_{(i,j) \in G} P_{ij} - \sum_{(j,s) \in G} P_{js} = 0; \\
 &\forall (i, j) \in G \quad P_{ij} \leq p_{ij}; \\
 &\forall (i, j) \in G \quad P_{ij} \geq 0; \\
 &F \geq 0,
 \end{aligned}$$

где G — граф сети; F — целевая функция, определяющая поток мощности через сеть, ограничиваемая номинальными (паспортными) пропускными способностями дуг; p_{ij} и P_{ij} — соответственно номинальная пропускная способность дуги (i, j) и поток мощности, передаваемый через нее.

Опираясь на свойство фрактальности, не теряя общности рассуждений, рассмотрим в качестве графа G электросети ее фрагмент. Соответствие между

Таблица 1

Соответствие между обозначениями элементов электросети и ее графа

ВЛ ₁ , КТП ₁	T ₁	T ₂	РС ₁	РС ₂	КЛ ₁	КЛ ₂	КЛ ₃	КЛ ₄
S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉

обозначениями элементов электросети и ее графа G приведены в табл. 1.

Решение поставленной задачи возможно на основе базовых алгоритмов реализации симплекс-метода [3] и Форда—Фалкерсона [4]. Однако это решение, как правило, не эффективно с точки зрения оперативности работы алгоритмов и позволяет получить лишь один вариант структуры сети, не всегда обеспечивающий требуемое качество других показателей эффективности, таких как потери электроэнергии в сети и надежность ее структуры. Поэтому возникает необходимость в исследовании других известных и разработке новых алгоритмов решения поставленной задачи.

Алгоритм Диница

Данный алгоритм представляет развитие базового алгоритма Форда—Фалкерсона, направленное на увеличение его быстродействия. Однако достичь существенных результатов в этом направлении удалось лишь для сетей с целыми и единичными пропускными способностями дуг [5].

Алгоритм состоит из этапов, на которых поток увеличивается одновременно вдоль всех кратчайших путей фиксированной длины. Для этого на r -м этапе строится вспомогательная бесконтурная сеть, которая содержит все увеличивающие пути, длина ко-

торых не превышает k_r , где k_r — длина кратчайшего пути из v в w .

Предлагаемая реализация алгоритма на r -м этапе состоит в следующем.

Шаг 1. Построение вспомогательной сети.

Осуществляется движение из истока v в сток w сети по допустимым дугам графа G , добавление их в поток f_k и соответствующее увеличение k . Дуга $u = (i, j)$ добавляется в путь с $f_k(u, v) = P(u, v) - p(u, v)$. При достижении стока w сети он помечается величиной k , которая становится "фиксированной". Поиск продолжается, но не из вершины v .

Если сток w не достигнут, то работа алгоритма завершается.

Если $k > k_r$, то осуществляется переход к этапу $r + 1$ с $k_r + 1 = k$.

Шаг 2. Поиск псевдомаксимального потока.

В полученной бесконтурной сети ищется псевдомаксимальный поток — поток, для которого не существует увеличивающих путей длины k . Найденный поток переносится в исходную сеть. Затем вновь выполняется переход к шагу 1.

Поиск псевдомаксимального потока выполняется следующим образом.

Пусть на j -й итерации найден путь из v в w . По этому пути пропускается поток f_j . Это означает, что, как минимум, одна дуга вспомогательной сети является насыщенной. Удаляются все насыщенные дуги. В результате могут образоваться "тупики":

- вершины, из которых не выходит ни одна дуга (кроме стока);
- вершины, в которые не входит ни одна дуга (кроме истока);
- изолированные вершины.

Эти вершины следует удалить со всеми инцидентными им дугами. Это может привести к образованию новых тупиков. Корректировка проводится до тех пор, пока во вспомогательной сети не останется ни одного тупика. Далее изменяются пропускные способности оставшихся дуг $P_k(u) = P_k(u) - f_j(u)$.

Поиск потока f_j продолжается до тех пор, пока вспомогательная сеть не окажется пустой. Полученный псевдомаксимальный поток переносится в исходную сеть.

После нахождения потока f_j и корректировки сети поиск можно продолжать с ближайшей к истоку v , но не подвергшейся изменениям дуги найденного пути.

После завершения работы алгоритма исходная сеть будет содержать максимальный поток F .

Метод расстановки пометок

Алгоритм реализации метода представляет собой поиск пути из истока v в сток w сети, для выпол-

нения которого необходимо выполнение следующих условий [6]:

- наличие у каждой вершины значения потока, пропускаемого через вершину на данной итерации;
- пометка вершин, выполняемая в соответствии с методом поиска в ширину (перебор вершин происходит последовательно, приоритет имеют вершины, равноудаленные от истока);
- выполнение алгоритма до тех пор, пока единственной непомеченной вершиной не останется сток.

Алгоритм может начинаться с некоторого допустимого потока F^0 и его распределения по дугам G или с нулевого потока. Он включает этапы расстановки пометок (этап 1) и изменения величины потока (этап 2).

На каждом шаге этапа 1 вычисления заканчиваются либо тем, что рассматриваемый поток F максимален и задача решена, либо тем, что поток может быть увеличен и следует перейти к этапу 2.

На этапе 1 каждая i -я вершина сети находится в одном из трех состояний: не помечена ($N_i = \Pi_i = 0$); помечена, но не просмотрена ($N_i \neq 0$); помечена и просмотрена ($N_i \neq 0, \Pi_i = 1$).

Предлагаемая реализация алгоритма состоит в следующем.

Предварительно помечается исток — $N_i = 1$ и $E_i = A$, где $i = 1$, а A — большое положительное число.

Реализуется этап 1 (расстановка пометок):

1.1. Выбирается очередная помеченная, но не рассмотренная i -я вершина сети.

1.2. Для всех вершину j , для которых $p_{ij} \neq 0$, вычисляются и приписываются следующие пометки: если $P_{ij} < p_{ij}$, то $E_j = \min(E_i, p_i - P_{ij})$, $N_j = i$; если $P_{ij} > 0$, то $E_j = \min(E_i, P_{ij})$, $N_j = i$. Просмотренная i -я вершина помечается — $\Pi_i = 1$.

1.3. В случае, если E_j меньше значения пропускной способности пути, рассчитанной для предыдущей вершины, то выбранная вершина не рассматривается, и переход на этап 2 не осуществляется; цикл начинается с пп. 1.1.

1.4. Подпункты 1.1—1.3 повторяются до тех пор, пока не будет выполнено одно из следующих условий:

- помечен, но не просмотрен сток сети w ;
- нельзя пометить ни одну из вершин, сток остается непомеченным.

В первом случае осуществляется переход к этапу 2, а во втором — задача решена и выполняется переход к пп. 2.4.

Реализуется этап 2 (изменение потока):

2.1. Для всех вершин, начиная со стока w , лежащих на пути, поток по которому может быть увеличен, анализируются пометки и изменяются потоки по дугам G и общий поток F . Если вершина s_j имеет пометку $N_j = i$, то вычисляется значение потока

по дуге $u = (i, j)$ по соотношению $P'_{ij} = P_{ij} + E_p$, а если $N_j = -i$, то по соотношению $P'_{ij} = P_{ij} - E_p$.

2.2. Вычисляется новое значение потока через сеть $F_i = E_p$.

2.3. Стираются пометки Π_i ($i = 2, p$); выполняется переход к этапу 1.

2.4. Сравниваются значения элементов множества F_i ; путь, при котором F достигает максимума, является искомым.

Эвристический алгоритм

Алгоритм основан на применении "графа приращений" [7]. В его основу положена эвристика, заключающаяся при выборе путей передачи электроэнергии использование ненасыщенных дуг графа G сети.

Обозначим $(v, S_1), (S_1, S_2), (S_1, S_3), (S_2, S_4), (S_3, S_5), (S_2, S_5), (S_3, S_4), (S_4, S_6), (S_4, S_7), (S_5, S_8), (S_5, S_9), (S_6, w), (S_7, w), (S_8, w), (S_9, w)$ дуги графа, а $p_{vS_1}, p_{S_1S_2}, p_{S_1S_3}, p_{S_2S_4}, p_{S_3S_5}, p_{S_2S_5}, p_{S_3S_4}, p_{S_4S_6}, p_{S_4S_7}, p_{S_5S_8}, p_{S_5S_9}, p_{S_6w}, p_{S_7w}, p_{S_8w}, p_{S_9w}$ — соответственно их пропускные способности.

Реализация алгоритма включает следующие этапы.

Этап 1. Из вершины v выбирается путь, по которому будет передаваться поток мощности в вершину w . В соответствии с F этот путь должен проходить через вершину S_i с $\max(p_{S_iw})$, $i = 1, \dots, m_4$, где i — индекс потребителя электроэнергии ПЭ, для которого строится поток. Величина потока определяется пропускной способностью p_{S_iw} дуги (S_i, w) .

Этап 2. Граф G преобразуется в граф G' , в котором для дуги (i, j) с нулевым потоком P_{ij} пропускная способность p_{ij} сохраняется прежней, а для дуги с ненулевым потоком заменяется на величину $p'_{ij} = p_{ij} - P_{ij}$; $P_{ij} \neq 0$.

Этап 3. Если построены потоки для всех узлов S_i , $i = 1, \dots, m_4$, то выполняется переход к этапу 5, иначе — к этапу 4.

Этап 4. Если в графе G' можно найти ненулевой поток из v в w , то выполняется переход к этапу 2 с новым графом G' , в котором исключается из рассмотрения вершина S_i , $i = 1, \dots, m_4$, через которую передается поток, иначе выполняется переход к этапу 8.

Этап 5. Если синтезированная структура электрической сети содержит контуры, то из них исключаются дуги с наименьшей пропускной способностью и вновь выполняется расчет. Данная процедура выполняется до тех пор, пока не будут исключены все контуры из структуры сети.

Этап 6. На данном этапе может выполняться оптимизация по критериям минимума потерь мощности в сети, максимума надежности сети и др. или их различным комбинациям, повышающим живучесть, безотказность, а также качество, безопасность и долговечность функционирования сети.

Это осуществляется путем удаления из синтезированной структуры различных сочетаний дуг (в том числе с не минимальными пропускными способностями), оценки лицом, принимающим решения (энергодиспетчером), получаемых структур сетей по соответствующим критериям или их комбинациям и принятии на основе этой информации решения о структуре сети.

Этап 7. Выдача сообщения о варианте полного восстановления электроснабжения.

Этап 8. При невозможности полного восстановления электроснабжения осуществляется анализ предложенного варианта в целях исключения контуров и обеспечения электроэнергией ПЭ первой и второй категорий по надежности электроснабжения, а также ПЭ с наибольшим ущербом от перебоев в электроснабжении.

Выдача сообщения о составе ПЭ, электропитание которых восстановлено.

Программы, реализованные в среде Delphi 7.0, практически повторяют рассмотренные алгоритмы.

Интерфейс взаимодействия пользователя с информационно-вычислительным комплексом

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) приведена экранная форма интерфейса взаимодействия пользователя с информационно-вычислительным комплексом, которая позволяют энергодиспетчеру работать с диалоговой системой в режиме оперативной визуализации.

После активизации диалоговой системы на экране появляется форма с закладками "Исходные данные", "Симплекс-метод", "Алгоритм Форда—Фалкерсона", "Алгоритм Диница", "Метод пометок" и "Эвристический алгоритм", одна из которых находится в активном состоянии.

При вызове закладки "Исходные данные" на экране появляются окна, в которых отображаются значения активных мощностей на вводах в предприятие, значения и графики активных мощностей ПЭ и максимальных из них по вводам, а также суммарная активная мощность, потребляемая предприятием и распределение ее по вводам.

В правом нижнем углу расположен справочник, позволяющий определять принадлежность ПЭ структурным подразделениям предприятия.

При вызове одной из закладок "Симплекс-метод", "Алгоритм Форда—Фалкерсона", "Алгоритм Диница", "Метод пометок" или "Эвристический алгоритм" отображается состояние коммутационной

аппаратуры различных уровней электрической сети предприятия, формируя тем самым выбранную топологию сети.

При этом единицы соответствуют включенным потребителям электроэнергии, а нули — отключенным.

Оценка эффективности алгоритмов

В табл. 2 приведена практическая оценка эффективности рассмотренных алгоритмов:

- по показателям оперативности их работы;
- по надежности структур электросетей и потерь электроэнергии в них, полученных в результате реализации алгоритмов.

Оперативность работы алгоритма определяли как разность между моментами начала его работы и вывода полученных результатов.

Относительные *потери электроэнергии в сети* вычисляли как разность между суммарной мощностью на высоковольтных вводах электроэнергии в предприятие и суммарной мощностью, потребляемой ПЭ, отнесенную к суммарной мощности на вводах, выраженную в процентах. Данные потери в основном обусловлены недокомпенсированной реактивной мощностью, циркулирующей в сети, создающей дополнительную нагрузку на ее элементы. При необходимости эту нагрузку можно учесть на стадии решения задачи, уменьшив пропускные способности дуг сети пропорционально потерям, вызываемым недокомпенсированной реактивной мощностью, которые обычно известны из опыта эксплуатации сети.

Таблица 2

Оценка эффективности алгоритмов

Показатели	Симплекс-метод	Алгоритм Форда—Фалкерсона	Алгоритм Диница	Метод расстановки пометок	Эвристический алгоритм
Оперативность работы алгоритма, мин	5...10	6...8	6...9	5...8	0,5...1,5
Потери электроэнергии в сети, %	14...16	13...15	13...14	13...14	12...15
Надежность структуры сети	3,0...3,4	2,8...3,2	2,8...3,2	2,8...3,2	2,6...3,2

Примечание. Таблица составлена по результатам 30 экспериментов, выполненных на ПЭВМ с процессором AMD Athlon X2 6000+, для электросети ОАО "СЭПО-ЗЭМ" Саратовское энергоагрегатное производственное объединение", содержащей 424 приемника электроэнергии. При увеличении числа экспериментов существенно расширяются лишь границы оперативности работы алгоритма, реализующего симплекс-метод.

Надежность структуры сети оценивали по сумме паспортных вероятностей отказов ее отдельных элементов.

По мере накопления статистических данных об отключениях (число и длительность перебоев в электроснабжении отдельных ПЭ) появляется возможность использования других показателей для оценки надежности сети, таких как коэффициент готовности, коэффициент вынужденного простоя, коэффициент отказов и др. Это открывает более широкие возможности для энергодиспетчера по выбору структуры надежно функционирующей сети.

Заключение

1. Выполнена математическая постановка задачи реконфигурации структур электрических сетей промышленных предприятий, обеспечивающих максимально полное восстановление электроснабжения приемников электроэнергии, обесточенных в результате дефицита мощности в электроэнергетической системе и аварий в системе электроснабжения предприятий.

2. Показано, что все рассмотренные алгоритмы, за исключением эвристического, с точки зрения используемых показателей для сетей с произвольной пропускной способностью дуг примерно равноценны. Эвристический алгоритм имеет значительно меньшее время реализации, что существенно при его использовании в режиме реального времени, так как приводит к уменьшению времени простоя технологического оборудования и снижению ущерба, который несут предприятия при нарушениях электроснабжения.

3. Данный алгоритм включен в состав специального математического обеспечения управления АСУ энергетикой ОАО "СЭПО-ЗЭМ" Саратовское энергоагрегатное производственное объединение".

Список литературы

1. Резчиков А. Ф., Иващенко В. А. Управление электропотреблением промышленных предприятий. Саратов: Издательский центр "Наука", 2008. 183 с.
2. Васильев Д. А., Лукьянов Д. В., Иващенко В. А. Принятие решений по электроснабжению в аварийных ситуациях на электрических сетях промышленных предприятий // Мехатроника, автоматизация, управление: материалы 7-й науч.-технич. конф. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010. С. 107—110.
3. Палий И. А. Линейное программирование. М.: Эксмо, 2008. 256 с.
4. Форд Л. Р., Фалкерсон Д. Р. Поток в сетях. М.: Мир, 1966. 276 с.
5. Адельсон-Вельский Г. М., Диниц Е. А., Карзанов А. В. Потокковые алгоритмы. М.: Наука, 1975. 120 с.
6. Пашкеев С. Д., Минязов Р. И., Могилевский В. Д. Машинные методы оптимизации в технике связи. М.: Связь, 1976. 201 с.
7. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети: Пер. с англ. М.: Наука, 1973. 368 с.



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Инсаров В. В., Щербенев А. К.

Методика компьютерного моделирования тепловых полей типовых объектов наземных сцен 61

Заведеев А. И.

Принципы построения отказоустойчивых систем управления ориентацией аэрокосмических летательных аппаратов 69

Желамский М. В.

Магнитный датчик положения и ориентации с шестью степенями свободы для управления подвижными объектами 75

В. В. Инсаров,

д-р техн. наук, зам. начальника отделения,

А. К. Щербанев, ведущий инженер,

ФГУП "Государственный

научно-исследовательский институт

авиационных систем", г. Москва

wiliam@gosniias.ru

Методика компьютерного моделирования тепловых полей типовых объектов наземных сцен*

Представлены методика компьютерного моделирования тепловых полей объектов наземных сцен, математическая модель типового объекта, алгоритм численного метода решения с граничными условиями на внешних и внутренних поверхностях, учитывающими лучистый и конвективный теплообмен на этих поверхностях для различных условий внешней среды. Приведены блок-схема компьютерной программы и результаты компьютерного моделирования тепловых полей типового объекта (дымовой трубы).

Ключевые слова: тепловые поля объекта, математические модели, методика компьютерного моделирования тепловых полей объекта

Введение

При построении систем управления движущимися объектами различного назначения (летательными аппаратами, в том числе беспилотными, мобильными роботами, транспортными средствами и т. д.) особое внимание уделяется выбору типа и набора бортовых сенсорных устройств и их характеристик, обеспечивающих получение достоверной информации о состоянии окружающей среды и, как следствие, эффективное решение поставленной задачи управления в различных условиях применения. В последнее время резко возрос интерес к использованию в таких системах тепловизионных (инфракрасных) сенсоров, отличающихся достаточно высоким разрешением, круглосуточностью применения в широком диапазоне погодных и климатических условий. Однако в процессе проектирования этих сенсоров, особенно на начальных стадиях, серьезные затруднения вызывает проблема имитации тепловых характеристик типовых объектов наземных сцен антропогенного и природного происхождения. Естественно, проведение натурных испытаний с регистрацией изменчивости тепловых характеристик в широком диапазоне условий применения весьма проблематично по финансовым, техническим и временным соображениям. Поэтому серьезное значение приобретают попытки ис-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-08-00703а.

пользования имеющихся результатов теоретических и экспериментальных исследований и построения на их основе адекватных математических моделей. Сложности в разрешении этой проблемы связаны с многофакторностью теплового поля и его изменчивостью, существенно затрудняющими возможности построения математических моделей, адекватных реальностям в широком диапазоне рассматриваемых условий возможного применения.

Указанная многофакторность связана, с одной стороны, с характеристиками самого моделируемого объекта, с другой стороны — со сложностью и многообразием теплофизических процессов на внешней поверхности и внутри объекта. Результаты одной из попыток в части разработки методики компьютерного моделирования тепловых портретов типовых объектов антропогенного происхождения рассмотрены в данной статье.

Математические модели и методика моделирования

Математическая модель температурного поля (теплового портрета) объекта сложной формы, расположенного на земной поверхности, при воздействии основных климатических факторов (суточных сезонных изменений температуры атмосферного воздуха, солнечной радиации, скорости и направления ветра) может быть описана нестационарным многомерным уравнением теплопроводности [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho} [\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v], \quad (1)$$

где T — температура; τ — время; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность, λ — коэффициент теплопроводности; q_v — интенсивность объемного тепловыделения.

Уравнение (1) характеризует в общем случае пространственно-временное изменение температуры в любой точке поля независимо от геометрической формы тела, его физических свойств и условий взаимодействия с окружающей средой. В каждом конкретном случае оно должно быть дополнено условиями однозначности, содержащими: геометрические параметры объекта; физические параметры, характеризующие теплофизические свойства материалов; краевые условия, характеризующие особенности протекания процесса — начальные и граничные условия (учитывающие конвективные и лучистые составляющие теплопередачи на внешней поверхности и для внутренних областей, а также локальные источники тепловыделения). В зависимости от преобладающей геометрической формы объекта уравнение теплопроводности (1) рассматривается в соответствующей этой форме системе координат: прямоугольной, цилиндрической или сферической. Если объект содержит совокупность элементов различной геометрической формы, то проводится декомпозиция объекта по элементам этих форм, и уравнение (1) решается для каждого

такого элемента в отдельности. Граничные условия могут задаваться, например, в виде представления удельного теплового потока в каждой точке поверхности объекта в любой момент времени τ :

$$q = f(x_w, y_w, z_w, \tau); (x_w, y_w, z_w) \in F, \quad (2)$$

где q — удельный тепловой поток; x_w, y_w, z_w — координаты точек поверхности объекта; F — поверхность объекта. Данный вид граничных условий характерен для случая, когда поверхность объекта подвергается воздействию теплового излучения от внешнего источника этого излучения, например солнечной радиации, от нагретой поверхности другого объекта, теплового излучения поверхности объекта в окружающую среду. В последнем случае зависимость удельного лучистого теплового потока $q_{ли}$ имеет вид

$$q_{ли} = \varepsilon_i \sigma T_i^4, \quad (3)$$

где ε_i — степень черноты поверхности, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [Вт/м²/К⁴] — постоянная Стефана—Больцмана излучения абсолютно черного тела; T_i — температура i -го элемента наружной поверхности объекта.

В других случаях граничные условия задаются в виде температуры окружающей среды и закона теплообмена между поверхностью объекта и окружающей средой. В этом случае обычно используется формула теплоотдачи Ньютона:

$$q_{ki} = \alpha_k (T_f - T_i), \quad (4)$$

где q_{ki} — удельный конвективный тепловой поток, поступающий в i -й элемент поверхности объекта; α_k — коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости и направления ветра, геометрии и размеров объекта, гидродинамического режима течения потока (воздуха, газа); T_f — температура окружающей среды (воздуха, газа); T_i — температура i -го элемента поверхности. Коэффициент теплоотдачи α_k учитывает конкретные особенности теплообмена и является функцией скорости движения среды, температур T_f и T_i , положения объекта в потоке, размеров объекта, физических параметров среды (теплопроводности, вязкости, теплоемкости и др.). Для задания значений этого коэффициента в каждом конкретном случае используются зависимости, полученные экспериментальным путем. Например, для условий вынужденной конвекции коэффициент α_k определяется с помощью критериальных эмпирических зависимостей вида [2]

$$Nu_f = C Re_f^m; Re_f = \frac{wx}{\nu_f}; \alpha_k = \frac{Nu_f \lambda_f}{x}, \quad (5)$$

где Nu_f и Re_f — критерии Нуссельта и Рейнольдса соответственно; x — характерный размер обтекаемой поверхности; λ_f — коэффициент теплопровод-

ности воздуха; w — скорость воздушного или газового потока; ν_f — коэффициент кинематической вязкости воздуха. Индекс f означает, что теплофизические свойства воздуха (λ_f, ν_f) определяются при температуре воздуха T_f ; C, m — значения коэффициентов, полученных по экспериментальным данным. Для каждого конкретного случая условий конвективного теплообмена ($w, x, T_f, \lambda_f, \nu_f$) вычисляется значение критерия Re_f и находятся значения коэффициентов C, m . В соответствии с уравнением (5) вычисляются значения критерия Нуссельта Nu_f и коэффициента α_k .

В случае теплового контакта нескольких объектов с различными теплофизическими свойствами (подразумевающего равенство температур объектов и тепловых потоков на поверхности контакта) граничные условия имеют вид

$$T_1(0, \tau) = T_2(0, \tau); -\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial n}, \quad (6)$$

где индексы 1, 2 относятся к объектам, находящимся в тепловом контакте; n — нормаль к поверхности контакта.

Аналитические решения уравнения (1) с нелинейными граничными условиями вида (2)—(6) получены в частных случаях, например, для одно- и двумерных уравнений теплопроводности тел простой формы (пластина, цилиндр, шар и т. д.) и, как правило, с граничными условиями только одного вида (конвективного, лучистого или контактного теплообмена). Поэтому в дальнейшем широкое распространение получили различные приближенные методы, в первую очередь, численные методы решения этих задач. В данной статье рассматривается решение этой задачи численным методом элементарных балансов [2].

Расчетная тепловая схема объекта в этом случае представлена в виде совокупности прямоугольных или цилиндрических элементов, в пределах которых закон изменения температуры приближенно принимается линейным, при этом каждый элемент связан с шестью соседними элементами. Размеры расчетных элементов конечно-разностной схемы принимаются значительно меньшими по сравнению с размерами всего рассматриваемого объекта. Это позволяет принять следующие допущения:

- изотермические поверхности в пределах данного элемента представляют собой концентрические поверхности, равноотстоящие одна от другой;
- значения среднего за время $\Delta\tau$ теплового потока через какую-либо поверхность пропорционально начальному в пределах элемента значению температурного градиента;
- увеличение энтальпии элемента пропорционально приращению температуры в центральной точке его объема.

С учетом сделанных допущений уравнение теплопроводности (1) в конечно-разностной форме имеет следующий вид:

$$T_i(\tau + \Delta\tau) = T_i A_{11} + (T_{K1} A_1 + T_{K2} A_2 + T_{K3} A_3 + T_{K4} A_4 + T_{K5} A_5 + T_{K6} A_6) \Delta\tau + B_i (q_w + q_{вн}) \Delta\tau;$$

$$A_{11} = 1 - \Delta\tau \sum_{Kj=K1}^{K6} A_{iKj};$$

$$A_{iKj} = \frac{1}{\sum_{Kj=K1} r_{iKj} C_i}; B_i = \frac{S_i}{C_i}, \quad (7)$$

где $T_1, T_{K1}, \dots, T_{K6}$ — значения температур i -го элемента и соседних элементов; $K1, K2, K3, K4, K5, K6$ — номера соседних элементов; $A_{11}, A_1, \dots, A_6, B_i$ — коэффициенты конечно-разностной схемы; $q_w, q_{вн}$ — суммарные радиационные и конвективные тепловые потоки на внешней (q_w) и внутренней ($q_{вн}$) поверхностях элемента соответственно (определяются граничными условиями); $\sum r_{iK}$ — сумма термических сопротивлений i -го и K -го элементов расчетной схемы; C_i — полная теплоемкость i -го элемента; S_i — площадь поверхности i -го элемента, обращенная к внешней среде или в сторону внутреннего объема.

Формула (7) представляет собой полином первой степени с коэффициентами, зависящими от теплофизических свойств, координатных отрезков и шага по времени $\Delta\tau$. Она соответствует явной конечно-разностной схеме решения уравнения теплопроводности и позволяет находить значения температуры во временном слое $\tau + \Delta\tau$, используя известные значения температуры для момента времени τ . На значение шага по времени $\Delta\tau$ должны быть наложены ограничения из-за погрешности, вызванной допущением, что средний тепловой поток за время $\Delta\tau$ считается пропорциональным начальному во времени градиенту температуры, т. е. при больших значениях $\Delta\tau$ ошибка экстраполяции резко возрастает, и это немедленно отражается на точности вычисления последующих температурных полей. Максимально допустимым значением шага $\Delta\tau_{max}$ является такое его значение, при котором коэффициент $A_{11} = 0$. Допустима оценка устойчивости по условию: $A_{11} > 0$.

Структурная схема моделирования тепловых полей объектов, отражающая совокупность основных вычислительных модулей, представлена на рис. 1. Поясним кратко назначение каждого модуля.

Для выбранного варианта наземной сцены выделяются типовые объекты по их геометрической форме: прямоугольные (здания, дороги, мосты, взлетно-посадочные полосы и т. д.), цилиндрические (дымовые трубы и градирни ТЭЦ, цистерны, различные трубопроводы и т. п.) и др. Путем анализа условия окружающей внешней среды (температуру воздуха, солнечную и рассеянную радиацию, тепловое излучение земной поверхности и соседних объектов, скорость и направление ветра и т. д.) и с учетом возможных источников тепловыделений внутри

каждого объекта (наличие конвективных тепловых потоков при движении дымовых газов в трубе, работу систем вентиляции и кондиционирования, лучистые тепловые потоки от внутренних поверхностей объекта или тепловыделяющего оборудования, машин и агрегатов) формируется блок исходных данных. На основании анализа условий теплообмена объекта с окружающей средой и выбранных воздействующих факторов задаются граничные условия на внешней и внутренней поверхностях данного объекта типа (2)–(6), составляющие совместно с уравнением (1) математическую модель i -го объекта сцены. Модуль решения уравнений математической модели i -го объекта включает в себя определение коэффициентов конечно-разностного уравнения (7) и температур в расчетных точках на каждом шаге интегрирования. После выполнения заданного числа циклов интегрирования результаты вычислений с помощью модуля вывода полученных данных записываются в текстовый файл в числовом виде и/или отображаются с помощью графиче-

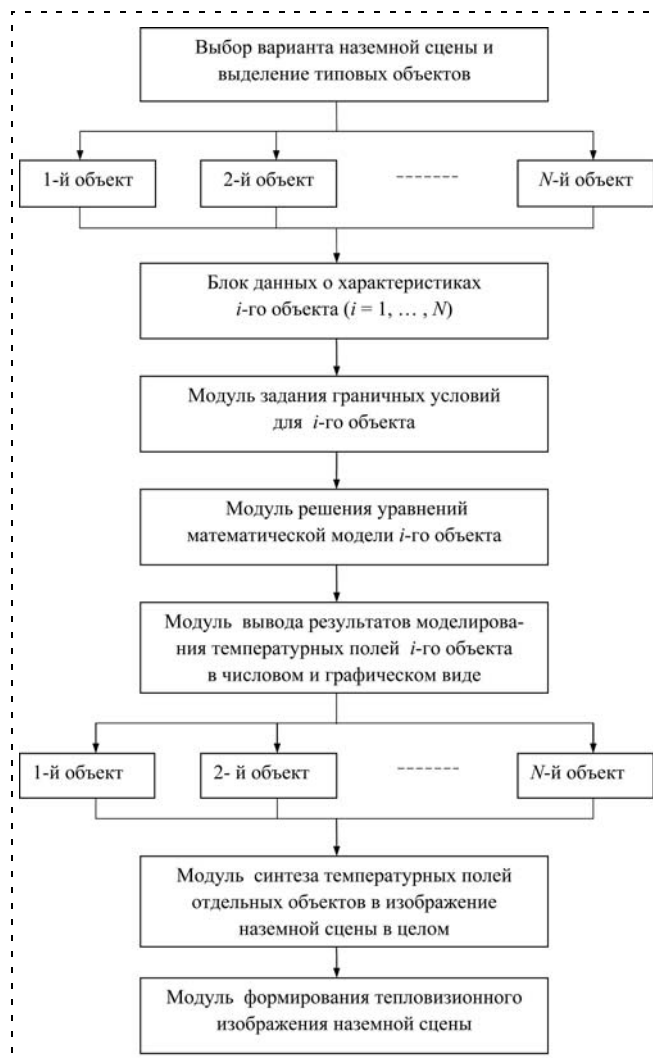


Рис. 1. Структурная схема моделирования тепловых полей объектов

ских подпрограмм. Результаты компьютерного моделирования тепловых полей отдельных объектов позволяют осуществить синтез температурного поля наземной сцены в целом (набора $i = 1 \dots N$ объектов) и, если требуется, получить тепловизионное изображение этой сцены.

Поскольку приведенное в этом разделе описание математических моделей и методики моделирования носит достаточно общий характер, ниже рассматривается конкретизация решения поставленной задачи на примере типового объекта — дымовой трубы. Данный объект представляет собой вертикальный многослойный полый цилиндр, на внешней поверхности которого учитывается воздействие солнечной радиации, собственное тепловое излучение этой поверхности в окружающую среду, а также конвективный теплообмен поверхности с атмосферным воздухом. На внутренней поверхности объекта учитываются конвективные тепловые потоки от дымовых газов и лучистые тепловые потоки от различных участков этой поверхности, имеющих различную температуру. С учетом этих воздействий сформируем соответствующие граничные условия. Будем рассматривать нестационарную трехмерную математическую модель данного объекта, позволяющую получить распределение температуры на внешних и внутренних поверхностях объекта с учетом характеристик климатических факторов заданного района и времени года для любого момента времени или в течение продолжительного промежутка времени, например нескольких суток.

Расчетная схема тепловой модели дымовой трубы

Расчетная схема дискретной тепловой модели дымовой трубы в поперечном сечении представлена на рис. 2, а. Цифрами 1, ..., 16 на схеме обозначены номера расчетных элементов. Ориентация дымовой трубы по сторонам горизонта учитывается координатными осями *North—South* и *East—West*. Расчетные точки 1, ..., 8 расположены на внешней, а точки 9, ..., 16 — на внутренней поверхности стенки дымовой трубы. Все расчетные точки располагаются равномерно по окружности поперечного сечения трубы с постоянным угловым шагом $\Delta\varphi = 45^\circ$.

Так как рассматривается только участок дымовой трубы, то разбиение на расчетные элементы в продольном направлении отсутствует и принимается постоянным размер элементов ΔL в этом направлении (по оси *z*). Конкретное значение величины ΔL в данном случае принципиального значения не имеет. Угловое положение расчетных элементов относительно координатных осей *North—South* и *East—West* характеризуется углом β . На расчетной схеме (рис. 2, а) также представлено положение Солнца (*Sun*) в произвольный момент времени суток, при этом угол α — это угол между направлением на Солнце и азимутом местности, который отсчитывается от южного направления по часовой стрелке.

В течение расчетного промежутка времени положение Солнца изменяется от восточного направления до западного и также изменяется угловое склонение Солнца в зависимости от широты местности и времени суток. Аналитические зависимости, отражающие эти изменения, можно найти в работах [3, 4].

Таким образом, тепловая модель дымовой трубы представляет собой совокупность элементов (цилиндрических сегментов), при этом каждый элемент связан теплопроводностью с шестью соседними элементами $K1, K2, K3, K4, K5, K6$ (рис. 2, б). Геометрические размеры элемента: R_{\max}, R_{\min} — больший и меньший радиусы; $\Delta\varphi, \Delta z$ — соответственно угловой размер и длина элемента. Расчетная точка i в элементе располагается либо в геометрическом центре, либо может быть "сдвинута" на любую из граней элемента в целях учета конвективного и лучистого теплообмена с внешней средой или теплообмена во внутренних полостях.

При этом расчетная точка не может находиться на границе разнородных материалов, т. е. должно выполняться требование "однородности" материала в пределах расчетного элемента. Блок данных о характеристиках тепловой модели дымовой трубы содержит: число точек расчетной схемы N ; шаг по времени Δt ; начальное (τ_0) и конечное (τ_k) значения промежутка времени, для которого проводится моделирование; календарную дату года (d); значения среднесуточной температуры воздуха ($T_{\text{ср.сут}}$) и амплитуды ее колебаний ($a_{\text{ср}}$) для этой даты и заданного пункта климатического района; начальные значения температуры элементов; широту этой местности φ ; коэффициент прозрачности атмосферы ρ_a ;

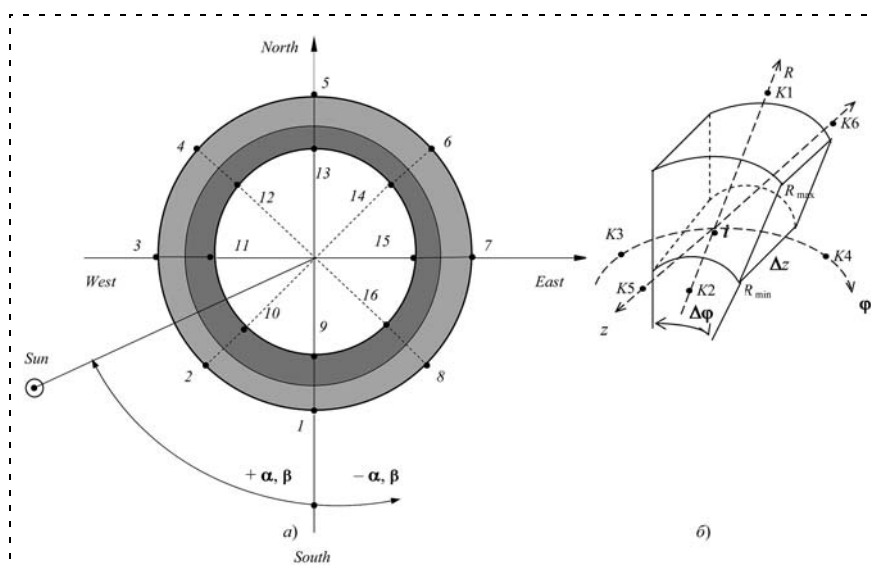


Рис. 2. Схема расположения расчетных точек тепловой модели дымовой трубы

значения скорости ветра W , скорости потока дымовых газов в трубе V_T и температуры этих газов T_T . Климатические характеристики окружающей среды для конкретной местности и времени года (среднесуточная температура воздуха, амплитуда колебаний температуры воздуха, скорость и направление ветра) принимаются по данным [5, 6].

Взаимное расположение элементов расчетной схемы может быть представлено в виде прямоугольной матрицы связей элементов C размера $N \times 9$, где N — число элементов расчетной схемы; элементы матрицы $c_{i,k}$ ($k = 1, 9$) имеют следующие обозначения:

$$c_{i,1} = K_1; c_{i,2} = K_2; c_{i,3} = K_3; c_{i,4} = K_4; c_{i,5} = K_5; \\ c_{i,6} = K_6; c_{i,7} = NH; c_{i,8} = NQ; c_{i,9} = NM,$$

где K_1, \dots, K_6 — номера соседних с i -м элементов (рис. 2, б); NH — условное целочисленное число, определяющее положение расчетной точки в i -м элементе расчетной схемы, например: $NH = 0, 1, \dots, 4$ — соответственно для расчетных точек, расположенных в центре элемента, на радиусах R_{\max} или R_{\min} , на боковой по углу φ или на торцевой поверхности элемента по оси z ; NQ — условное целочисленное число, задающее номер зоны на внешней поверхности дымовой трубы, если учитываются различные условия теплообмена на участках этой поверхности, например, участок, облучаемый потоком солнечной радиации или теневая часть поверхности; наветренная, или подветренная часть внешней поверхности и т. п.; NM — условные номера материалов стенки дымовой трубы, для которых задаются значения теплофизических свойств этих материалов.

Геометрические характеристики элементов расчетной схемы (рис. 2, б) также представляются матрицей R размера $N \times 5$; элементы матрицы $r_{i,k}$ ($k = 1, 5$) имеют следующие обозначения:

$$r_{i,1} = R_{\max}; r_{i,2} = R_{\min}; r_{i,3} = \Delta\varphi; r_{i,4} = \Delta z; r_{i,5} = \beta,$$

где R_{\max} — наибольший радиус i -го элемента; R_{\min} — соответственно наименьший его радиус; $\Delta\varphi$ — угловой размер в градусах или радианах i -го элемента; Δz — длина i -го элемента в направлении оси z (в данном конкретном случае $\Delta z = \Delta L$); β — характеризует угловое положение расчетного элемента схемы на внешней поверхности относительно азимута местности.

Теплофизические характеристики материалов стенки дымовой трубы (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность) задаются матрицей M размера $K_M \times 3$, где K_M — количество материалов элементов расчетной схемы; элементы матрицы $m_{i,k}$ ($k = 1, 3$) имеют следующие обозначения: $m_{i,1} = \rho$; $m_{i,2} = C_p$; $m_{i,3} = \lambda$, где ρ — плотность данного материала; C_p — его удельная теплоемкость; λ — его теплопроводность.

Граничные условия на внешних и внутренних поверхностях объекта

Конвективный теплообмен на внешних и внутренних поверхностях объекта

Для расчета конвективного теплообмена на внешних и внутренних поверхностях объекта используются граничные условия вида (4), (5), где $T_f = T_B$ — температура воздуха; $x = D$ — наружный диаметр дымовой трубы; w — скорость ветра. Значения коэффициентов C , m , полученных по экспериментальным данным [2], приведены в табл. 1 в зависимости от значения критерия Рейнольдса Re_f .

Суточное изменение температуры воздуха T_B описывается уравнением

$$T_B = T_{\text{ср.сут}} + \frac{a_{\text{ср}}}{2} \sin \frac{\tau - 9}{12} \pi,$$

где $T_{\text{ср.сут}}$ — среднесуточная температура воздуха; $a_{\text{ср}}$ — суточная амплитуда изменения температуры воздуха; τ — время в часах.

На внутренних поверхностях объекта могут иметь место процессы естественного и вынужденного конвективного теплообмена. В случае вынужденного конвективного теплообмена удельный конвективный тепловой поток q_{ki} к i -му элементу внутренней поверхности дымовой трубы определяется в соответствии с (4), (5), где $x = D$ — внутренний диаметр трубы, $T_f = T_T$, $w = V$ — соответственно температура и скорость потока дымовых газов.

Критериальное уравнение для определения значения коэффициента конвективной теплоотдачи при ламинарном или турбулентном режимах течения теплоносителя имеет вид [2]

$$Nu_f = 1,4 \left(Re_f \frac{D}{L} \right)^{0,4} Pr_f^{0,33} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}; \\ Nu_f = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где $Nu_f = \frac{\alpha_{ki} D}{\lambda_f}$; $Re_f = \frac{VD}{\nu_f}$; $Pr_f = \frac{\nu_f}{a_f}$; $Pr_w = \frac{\nu_w}{a_w}$; L — длина трубы; индексы f, w означают, что теплофизические свойства теплоносителя ($\lambda_f, \nu_f, a_f, \lambda_w, \nu_w, a_w$) определяются при температуре $T_f = T_T$ и $T_w = T_i$ со-

Таблица 1
Значения эмпирических коэффициентов C, m

Параметры	Значение			
	5...80	80...5 · 10 ³	5 · 10 ³ ...5 · 10 ⁴	>5 · 10 ⁴
Re_f	5...80	80...5 · 10 ³	5 · 10 ³ ...5 · 10 ⁴	>5 · 10 ⁴
C	0,81	0,695	0,197	0,023
m	0,40	0,46	0,60	0,80

ответственно. Уравнения (8) применимы при значениях $Re_f > 10$, $0,06 < \frac{Pr_f}{Pr_w} < 10$ и $Re_f = 1 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$, $Pr_f = 0,6 \dots 200$ соответственно.

Тепловое воздействие солнечной радиации на внешних поверхностях объекта

Граничные условия на внешних поверхностях объекта в условиях воздействия солнечной радиации задаются в виде удельного теплового потока $q_{ли}$ вида (2), (3) к i -му элементу внешней поверхности объекта с температурой T_i в текущий момент времени:

$$q_{ли} = I_c - \varepsilon_i \sigma T_i^4,$$

где I_c — суммарное значение теплового потока прямой и рассеянной солнечной радиации; ε_i — степень черноты i -го элемента поверхности.

Тепловой поток прямой солнечной радиации на внешней поверхности, перпендикулярной направлению лучей, с достаточной точностью описывается формулой [3]

$$I_{пр} = I_{max} \frac{\sin h}{\sin h + \frac{1-\rho}{\rho}},$$

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \gamma,$$

где $I_{max} = 1362 \text{ Вт/м}^2$ — значение солнечной постоянной; h — высота Солнца над горизонтом, °; ρ — коэффициент прозрачности атмосферы ($\rho = 0,7 \dots 0,8$). Если считать, что, примерно, 30 % радиации отражается в космос [4], то значение $I_{max} = 900 \text{ Вт/м}^2$. Высота Солнца над горизонтом h зависит от географической широты местности φ , склонения Солнца δ , часового угла γ . Так как одному часу соответствует поворот Земли вокруг оси на 15° , то $\gamma = 15\tau$, где τ — истинное местное время в часах, отсчитываемое от полудня. Величина склонения Солнца δ зависит от времени года, изменяясь от $-23,4^\circ$ 22 декабря (зимнее солнцестояние в северном полушарии Земли) до $23,4^\circ$ 22 июня (летнее солнцестояние) и вычисляется по формуле [4]

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (d - 81) \right],$$

где d — значение дня года (для 1 января $d = 1$).

Тепловой поток солнечной радиации, поступающий на наклонную поверхность объекта I_H , вычисляется по формуле [3]

$$I_H = I_{пр} \sin h \cos \psi K_A,$$

где ψ — угол наклона поверхности к потоку прямой солнечной радиации; K_A — коэффициент, учитывающий длину пути солнечных лучей в атмосфере, определяемый по данным [4] как $K_A = 1,1254 - 0,1366(1/\sin h)$, где величина $1/\sin h$ характеризует длину пути солнечных лучей в атмосфере. Для оп-

ределения теплового потока солнечной радиации, поступающего на вертикальную поверхность объекта I_B , необходимо учитывать положение этой поверхности относительно меридиана, характеризующегося углом азимута Солнца α и углом β , определяющим положение вертикальной поверхности относительно меридиана:

$$I_B = I_{пр} \cos h \sin |\alpha - \beta|; \sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \gamma}{\cos h}.$$

Дополнительно к прямой солнечной радиации на поверхность объекта поступает и рассеянная радиация, связанная с тепловым излучением атмосферного воздуха. Тепловой поток I_p рассеянной радиации определяется зависимостью [4]

$$I_p = 137,1 - 14,82(1/\sin h).$$

Суммарное значение прямой I_B и рассеянной I_p радиации составляет

$$I_c = I_B + I_p.$$

Таким образом, представленная выше методика определения потоков солнечной радиации позволяет в зависимости от широты местности расположения объекта, времени года и времени суток формировать граничные условия на внешних поверхностях объекта для учета теплового воздействия солнечной радиации.

Лучистый теплообмен на внутренних поверхностях объекта

Для формирования граничных условий на внутренних поверхностях объекта рассмотрим случай лучистого теплообмена в замкнутом объеме, ограниченном выпуклой поверхностью F с произвольным распределением температуры и степени черноты [2]. Замкнутая поверхность F разбивается на N элементов и рассматриваются две зоны: одной из них является j -й элемент, а другой принадлежит оставшаяся часть поверхности F . Площадь этой зоны поверхности S_F , за исключением площади j -го элемента, а также осредненные значения температуры T_F^4 и степени черноты ε_F определяются следующими выражениями:

$$S_F = \sum_{i=1, i \neq j}^N S_i$$

$$T_F^4 = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^N T_i^4 \varepsilon_i S_i}{\sum_{i=1, i \neq j}^N \varepsilon_i S_i}; \varepsilon_F = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^N \varepsilon_i S_i}{\sum_{i=1, i \neq j}^N S_i}.$$

Тогда лучистый тепловой поток q_j к j -му элементу определяется как

$$q_j = \frac{\sigma(T_j^4 - T_F^4)}{\frac{1}{\varepsilon_j} + \frac{S_j}{S_F} \left(\frac{1}{\varepsilon_F} - 1 \right)}$$

Блок-схема программы компьютерного моделирования

Функциональная схема модулей программы *TUBE* представлена на рис. 3. Главный модуль программы (*Program TUBE*) служит для инициализации всех переменных и обращения к остальным модулям программы. Модуль *BBOD* содержит подпрограммы, обеспечивающие ввод из текстового файла *TUBE.DAT* исходных данных геометрических размеров расчетных сегментов, логических связей между ними, теплофизических характеристик материалов, широты местности и календарной даты года, значений среднесуточной температуры воздуха и амплитуды ее суточных колебаний, скорости ветра, продолжительности расчетного режима

и т. д.). Начальные значения температуры в расчетных точках могут быть заданы, например, равными значению среднесуточной температуры воздуха или профилем температуры в этих точках, полученным расчетным или экспериментальным методом для заданного момента времени. Модуль *CAVITY* служит для вычисления геометрических характеристик сегментов на внутренних поверхностях тепловой модели объекта. Модуль *SELEKT* используется для вычисления приведенных значений степени черноты внутренних поверхностей. Модуль *Coefficients* включает в себя подпрограммы для вычисления значений коэффициентов уравнения (7). Модуль *CTS EXT* (*Convective Thermal Stream External surface*) на каждом временном шаге вычисляет конвективные тепловые потоки, поступающие через внешнюю поверхность объекта. Модуль *RTS EXT* (*Radiant Thermal Stream External surface*) также на каждом временном шаге вычисляет лучистые тепловые потоки, поступающие через внешнюю поверхность объекта. Модуль *RTS INT* (*Radiant Thermal Stream Internal surface*) включает в себя подпрограммы для вычисления лучистых тепловых потоков, поступающих через внутреннюю поверхность объекта. Модуль *CTS INT* (*Convective Thermal Stream Internal surface*) на каждом временном шаге вычисляет конвективные тепловые потоки, поступающие через внутреннюю поверхность объекта. Модуль *SOLVE* является центральным ядром программы и обеспечивает решение уравнения (7), вычисляет значения температуры сегментов в расчетных точках на каждом временном шаге.

Условный оператор $\tau = T_p$ в заданные моменты времени обращается к модулю *PRINT FILE* для вывода результатов расчета температуры в расчетных точках тепловой схемы в текстовый файл. Условный оператор $\tau < T_k$ проверяет условие окончания процесса вычислений после выполнения заданного числа циклов интегрирования. Модуль *GRAPHIC* содержит функции и подпрограммы для представления результатов расчета в графическом виде.

Результаты математического моделирования тепловых полей дымовой трубы

Математическое моделирование тепловых полей участка дымовой трубы проводилось для климатических условий в районе Москвы в момент летнего солнцестояния (22 июня). Для этих условий значение среднесуточной температуры окружающего воздуха составляет 28 °С, и амплитуда суточных колебаний этой температуры равна 12 °С. Склонения Солнца для этой даты на широте Москвы (56° с. ш.) имеет максимальное значение, равное 23,45°. Максимальная высота Солнца над горизонтом, равная 57,4° достигается в 12 ч истинного солнечного времени для данной местности. Стенка дымовой трубы состоит из двух слоев кирпича: наружного слоя строительного кирпича толщиной 20 см и внутреннего слоя огнеупорного кирпича

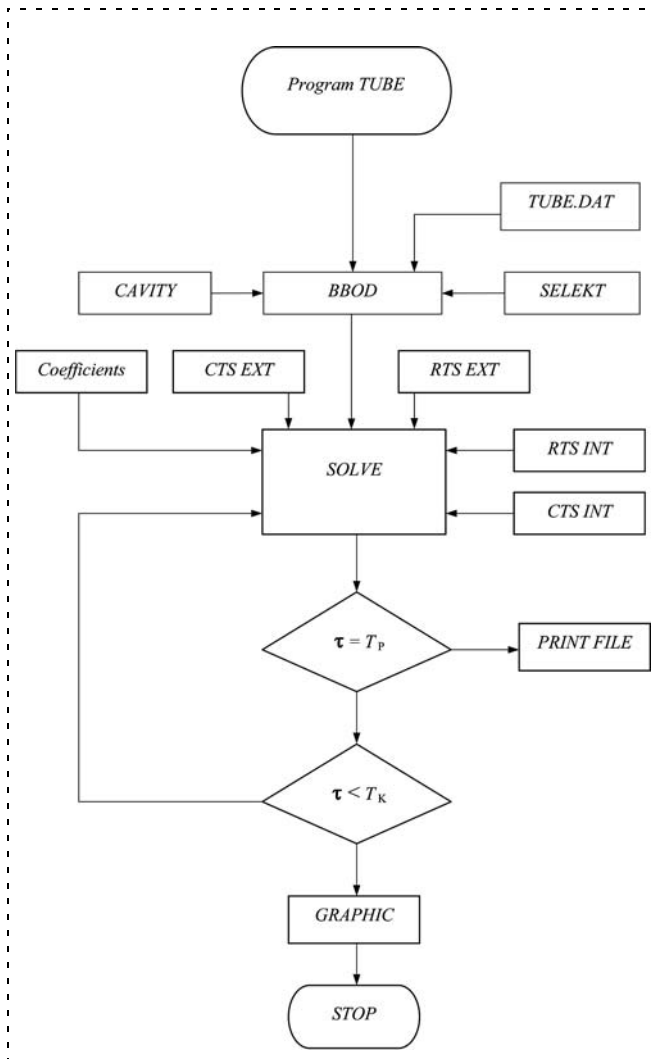


Рис. 3. Функциональная схема программы *TUBE*

Максимальные значения температуры поверхности

Параметры	Значения													
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
τ , ч	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
T , °C	10,5	7,3	5,9	17,0	28,7	32,2	33,2	32,8	35,1	37,5	31,8	19,9	14,1	
β , °	67	65	65	-68	-81	-83	-38	5,0	58	81	76	68	68	
α , °	-137	-128	-110	-100	-79	-46	0,0	46	79	100	110	128	137	
h , °	-11	-6,6	4,2	19,3	35,9	50,7	57,4	50,7	35,9	19,3	4,2	-6,6	-11	

толщиной также 20 см. Внутри трубы движется поток дымовых газов с температурой 250 °C и со средней скоростью 3,2 м/с. Наружная поверхность дымовой трубы обдувается потоком ветра со скоростью 2 м/с. Тепловой поток солнечной радиации, поступающий на внешнюю поверхность дымовой трубы, зависит от ориентации участка этой поверхности к направлению солнечных лучей и в расчетах учитывается азимутом Солнца в каждый момент времени суток. В качестве начальных значений температуры в расчетных точках принимали среднесуточную температуру воздуха. Для достижения теплового равновесия по толщине стенки дымовой трубы за счет прогрева ее потоком дымовых газов длительность режима прогрева задавали продолжительностью двое суток (48 ч). Для последующих суток были определены температурные поля на внешней поверхности дымовой трубы, которые представлены на рис. 4 в виде графиков зависимости температуры от углового положения элемента по окружности дымовой трубы (угол β) для различных моментов времени суток.

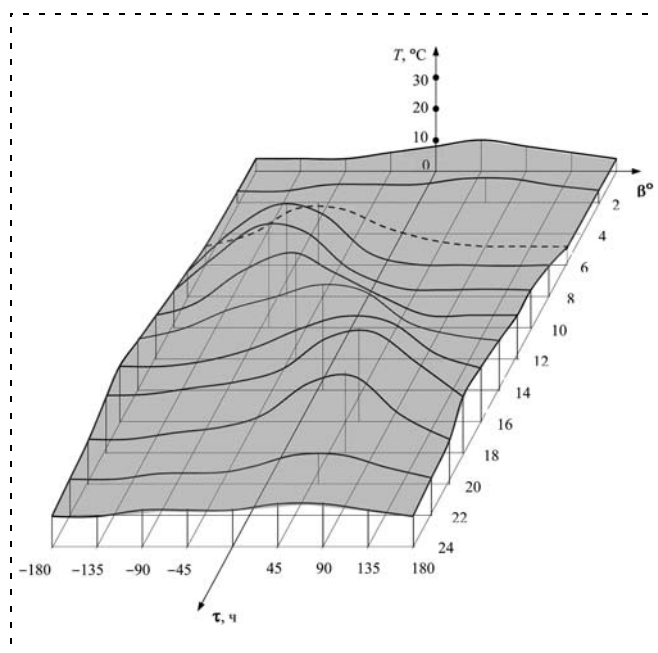


Рис. 4. Результаты моделирования тепловых полей дымовой трубы

Прослеживается явная зависимость температуры внешней поверхности от степени облученности ее потоком солнечной радиации. Этот тепловой поток зависит от азимутального положения Солнца (угол α), угловой высоты Солнца над горизонтом h и ориентации элемента внешней поверхности (угол β) относительно меридиана данной поверхности. Максимальные значения температуры поверхности для различных моментов времени суток приведены в табл. 2.

Заключение

Разработанная математическая модель и методика компьютерного моделирования позволяют получить расчетные значения тепловых полей типовых объектов наземных сцен. В качестве примера, иллюстрирующего возможность такого моделирования, выбран наиболее сложный объект — дымовая труба, поскольку в этом случае необходимо учитывать характеристики теплообмена как на внешних, так и на внутренних поверхностях объекта. Во многих других случаях (например, для объектов типа взлетно-посадочной полосы, отдельных промышленных зданий и т. д.) достаточно ограничиться рассмотрением только характеристик теплообмена на внешних поверхностях. Разумеется, для оценки адекватности принятой математической модели необходимо сопоставление полученных расчетных значений тепловых полей с соответствующими результатами, полученными экспериментальным путем. Такое сопоставление предполагается осуществить на следующем этапе исследований.

Список литературы

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
2. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.
3. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П. Радиационный расчет наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеоиздат, 1978.
4. Бринкворт Б. Солнечная энергия для человека. М.: Мир, 1976.
5. ГОСТ 16350—80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Издательство стандартов, 1981.
6. Строительные нормы и правила СНиП 2.01.01—82. Строительная климатология и геофизика. М.: Издательство литературы по строительству, 1983.

А. И. Заведеев, канд. техн. наук, доц.,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)
verazavedeeva@qwertyru.ru

Принципы построения отказоустойчивых систем управления ориентацией аэрокосмических летательных аппаратов

Рассматриваются различные принципы построения отказоустойчивых систем управления ориентацией аэрокосмических летательных аппаратов. Проведено сравнение методов синтеза грубых формирователей разностных сигналов при наличии структурируемых и неструктурируемых неопределенностей. Предложены алгоритмы диагностики отказов, использующие систему уравнений "проверки на соответствие".

Ключевые слова: летательный аппарат, система управления ориентацией, диагностика, отказ, повреждение, алгоритм контроля, формирователь разностей

Постановка задачи

Разработка интегрированной системы управления (ИСУ) современными и перспективными аэрокосмическими летательными аппаратами требует применения специальных средств обеспечения отказоустойчивости в процессе их эксплуатации. Под отказоустойчивостью понимают способность системы автоматически восстанавливать работоспособность при возникновении неисправностей, отказов ее элементов, а также нештатных ситуаций. Для обеспечения отказоустойчивости используют принцип избыточности (аппаратурной, аналитической, программной, временной и др.). Основное внимание при обеспечении отказоустойчивости ИСУ следует уделять информационно-измерительной и исполнительно-силовой составляющим.

Построению отказоустойчивых систем управления посвящена монография [1], а в аналитическом обзоре [2] рассмотрены вопросы реконфигурации систем управления ЛА различных классов в нештатных ситуациях и при возникновении отказов. Решению данной проблемы посвящены научные исследования, проводимые в по-

следнее десятилетие на кафедре "Системы автоматического и интеллектуального управления" МАИ [3–6].

В целях исключения или снижения влияния отказов измерительных и исполнительных устройств на работоспособность системы в целом необходимо обеспечить непрерывный контроль за их функционированием. Одним из возможных способов поддержания работоспособности систем является комплекс мер, получивший название **реконфигурации**. Как отмечалось в работах [5, 6], системы управления, допускающие отказы, по уровню осуществляемого процесса реконфигурации условно можно разделить на робастные, реконфигурируемые и реструктурируемые.

Актуальным и важным при разработке теории и методов проектирования реконфигурируемых систем управления динамическими объектами представляется применение принципа функционального резервирования, предполагающего в отличие от аппаратного резервирования аналитическую и структурную избыточность и построение на их основе резервных контуров управления. Такой подход к проектированию систем управления сложными динамическими объектами, например, многоразовыми космическими транспортными кораблями и орбитальными станциями, обеспечивает максимальную надежность и живучесть системы при заданном уровне допустимых отказов (толерантности).

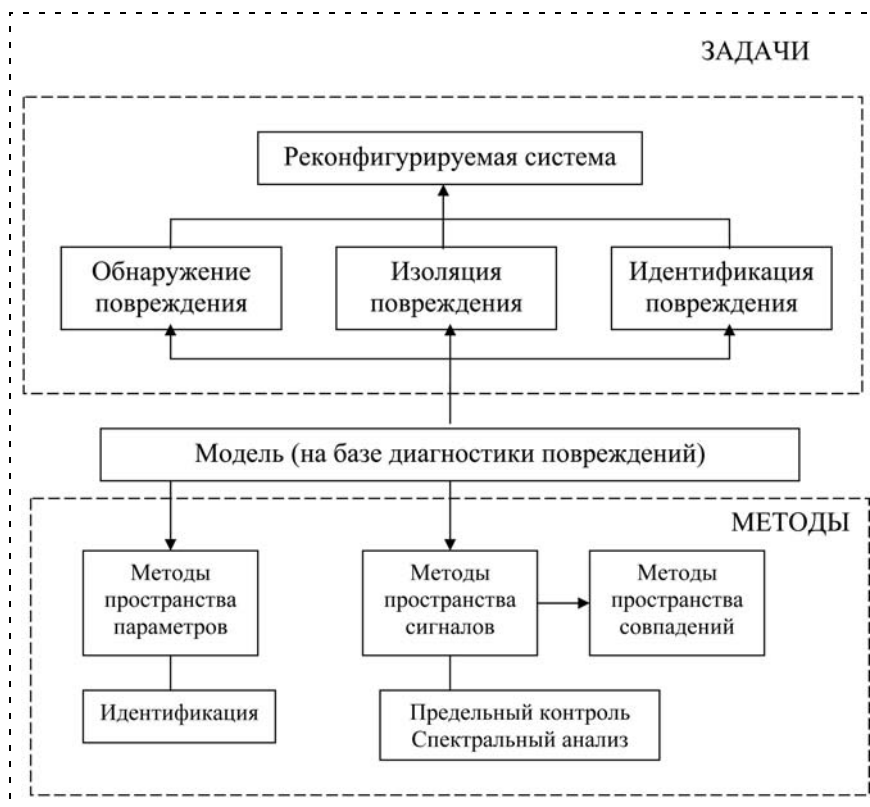


Рис. 1. Задачи и методы диагностики повреждений

Диагностика состояния и способы поддержания работоспособности системы управления при отказах (принцип реконфигурации)

Современные аэрокосмические системы подвержены таким явлениям, как вариации условий функционирования, отказы составляющих элементов и устройств, которые приводят к снижению основных динамических характеристик, а в некоторых случаях и к полной потере работоспособности системы. При разработке надежной отказоустойчивой системы управления или поддержании характеристик на допустимом уровне для сложных технических объектов крайне важно, чтобы такие изменения немедленно определялись и диагностировались для введения корректирующих действий в целях реконфигурации системы управления и ее адаптации к этим изменениям [2]. Контроль, осуществляемый для определения повреждений, называют диагностикой неисправности системы. Система контроля должна решать две основные задачи: обнаружение повреждения и его исключение (ОПИ) (рис. 1). Определение неисправности сводится к принятию альтернативного решения: либо все исправно, либо где-то в системе произошел сбой. В задаче изоляции неисправности необходимо найти источник неисправности, например, определить, какой датчик, рулевой привод или орган управления получил повреждение. Для реконфигурации системы относительно неисправности в задаче диагностики необходима их идентификация.

Процедура ОПИ может осуществляться с использованием информации о контролируемой системе, т. е. на основе математической модели системы. Такой подход известен как принцип аналитического резервирования или количественное ОПИ и требует поиска более совершенных методов диагностики.

В последние годы внимание исследователей привлекают грубые методы ОПИ, которые позволяют определять зарождающиеся (слабые или малые) неисправности в системе прежде, чем они перерас-

тут в проблемы, требующие вмешательства человека-оператора или автоматической системы (адаптации или реконфигурации).

В рамках методов, основанных на применении математических моделей, можно выделить три группы методов:

- *пространство параметров* (параметрическое оценивание и идентификация);
- *пространство сигналов* (анализ характеристик входных и выходных сигналов, предельный контроль);
- *пространство совпадений или соответствий* (формирование разностей или векторов соответствия) (рис. 2).

Методы второй группы характеризуются простотой реализации, однако предельный контроль существенно зависит от действующих условий и входных сигналов. Методы пространства соответствий (паритетов) позволяют преодолеть этот недостаток. Идея здесь заключается в генерировании вспомогательных сигналов (разностей или векторов соответствия), которые не зависят от действующих условий и входных сигналов. Разности указывают на повреждения и инициируются в идеальном случае только ими, следовательно, для определения повреждений можно использовать фиксированный порог.

Элементы пространства соответствий представляют собой разности, образованные согласно принятому уравнению. Задача ОПИ заключается в формировании пространства (вектора) соответствий и в анализе его элементов.

Процесс обнаружения неисправности и ее изоляции включает следующие три стадии:

- формирование разностей, когда входные и выходные сигналы системы преобразуются по заданному алгоритму так, чтобы отличаться от нуля при возникновении неисправностей;
- принятие решения на основе анализа разностных сигналов с помощью решающих функций и решающих правил для установления характера повреждения. Возможен простой контроль порогового значения текущей переменной, изменения среднего значения разностей или применение методов теории статистических решений, например, с помощью вероятности последовательных испытаний;

- исключение неисправности по совокупности разностей.

Разностные сигналы формируются на основе динамических соотношений по сигналам с выхода датчиков и входа силовых приводов. В данной статье описываются особенности процедуры ОПИ с помощью пространства соответствий.

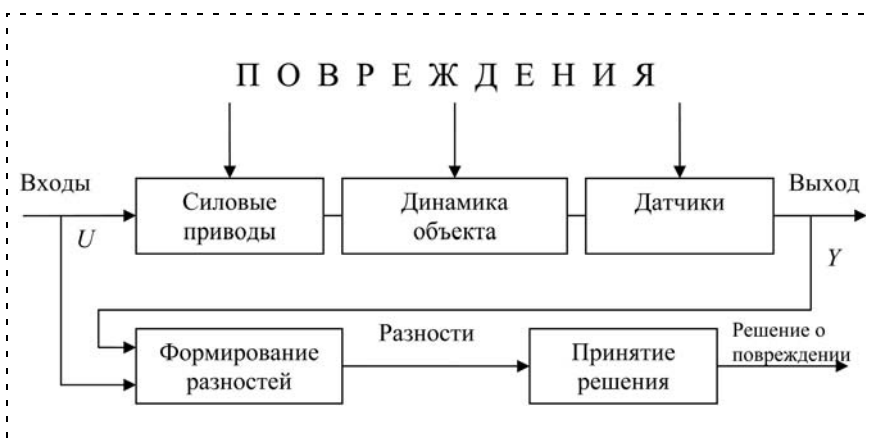


Рис. 2. Осуществление процесса ОПИ в две стадии

Формирование разностей с помощью передаточных функций

Рассмотрим следующую модель контролируемой системы:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{R}_1\mathbf{f}(k); \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{R}_2\mathbf{f}(k), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(k) \in R^n$ — вектор состояния; $\mathbf{y}(k) \in R^m$ — выходной вектор; $\mathbf{u}(k) \in R^r$ — входной вектор (управление); \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 — известные матрицы соответствующих размерностей; $\mathbf{f}(k) \in R^q$ — вектор повреждений с элементами $f_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, q$), представляющими собой отдельные неисправности системы. Характеристики неисправностей будем считать неизвестными функциями времени. Система "вход—выход" описывается выражением

$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z) + \mathbf{G}_f(z)\mathbf{f}(z),$$

где

$$\mathbf{G}_u(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D};$$

$$\mathbf{G}_f(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2.$$

Важную роль в данном процессе играет способ формирования разностей. При возникновении неисправностей одна или более разностей должны принять значительную величину, следовательно, принцип заключается в сравнении результатов измерений с априорной информацией через разности и их анализ.

В общем случае формирователь разностей можно описать выражением

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_u(z)\mathbf{u}(z) + \mathbf{H}_y(z)\mathbf{y}(z), \quad (2)$$

где $\mathbf{H}_u(z)$, $\mathbf{H}_y(z)$ — матрицы передаточных функций, реализуемые в линейных устойчивых системах. Разность должна равняться нулю при отсутствии неисправности и в случае неопределенности, т. е.

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z).$$

Синтез заключается в выборе передаточных матриц $\mathbf{H}_u(z)$, $\mathbf{H}_y(z)$, удовлетворяющих условию

$$\mathbf{H}_u(z) = -\mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_u(z). \quad (3)$$

При возникновении неисправности вектор разностей принимает вид

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_f(z)\mathbf{f}(z).$$

При повреждении i -го элемента i -й столбец передаточной матрицы $\{\mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_f(z)\}$ должен быть ненулевым в переходном и в установившемся режимах, т. е. $\{\mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_f(z)\}_i \neq 0$.

Важными моментами являются отключение неисправного элемента и устранение неисправности. Несмотря на то, что для обнаружения неисправности достаточно единственного разностного сигнала, для ее исключения требуется совокупность (вектор)

разностей, которая формируется одним из двух способов.

1. Структурируемая разностная совокупность: для образования совокупности разностей каждая из них должна быть чувствительна к некоторым из группы повреждений.

2. Направленные разностные векторы: разностный вектор должен быть зафиксирован в направлении заданных неисправностей в пространстве паритетов. Базисом для исключения отказа является обозначение (сигнатура) отказа, т. е. признак диагностируемой модели, определяющий влияние отказов. Каждое обозначение должно относиться только к определенной неисправности.

Проблемы исключения неисправностей датчика и силового привода сводятся к разрешению системы уравнений

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_1\mathbf{f}_{СП}(k); \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_d(k) \end{aligned}$$

или

$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z) + \mathbf{G}_{СП}(z)\mathbf{f}_{СП}(z) + \mathbf{f}_d(z),$$

где $\mathbf{f}_d(z)$, $\mathbf{f}_{СП}(z)$ — векторы неисправностей в датчике и силовом приводе (СП) соответственно.

При неисправностях в датчике вектор разностей примет вид $\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\mathbf{f}_d(z)$, где матрица $\mathbf{H}_y(z)$ выбирается из специфических требований. Для исключения неисправности i -го датчика $\mathbf{r}(z)$ выбирают из условия обнуления i -го столбца $\mathbf{H}_y(z)$. Если матрица $\mathbf{H}_y(z)$ является диагональной, то каждая разность определяется специфической неисправностью датчика. Единственное ограничение на $\mathbf{H}_y(z)$ заключается в требованиях физической осуществимости и устойчивости. Матрицу $\mathbf{H}_u(z)$ находят согласно выражению (3). Поскольку $\mathbf{H}_y(z)$ выбирают произвольно, то исключение неисправности датчика можно всегда осуществить.

При неисправностях силового привода имеем $\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_{СП}(z)\mathbf{f}_{СП}(z)$. В некоторых случаях определить $\mathbf{H}_y(z)$ затруднительно, и для исключения неисправностей силового привода можно применить методы теории фильтрации, а также принцип наблюдателя Люэнбергера или фильтра Калмана для оценки неизвестного входного сигнала.

Формирование разностей с использованием избыточных сигналов

Допустим, некоторый оператор F_1 образует на выходе системы произвольный (избыточный) сигнал \mathbf{y}_1 , который вместе с реальным сигналом \mathbf{y} при отсутствии повреждения формирует разность \mathbf{r} согласно выражению

$$\mathbf{r} = F_2(\mathbf{y}, \mathbf{y}_1) = 0. \quad (4)$$

Простейший способ заключается в дублировании системы, т. е. оператор F_1 выбирают идентичным

исходной системе при том же входном сигнале. Разность формируется как отклонение выходного сигнала дублированной системы относительно исходной. Для упрощения такого способа роль дублирующего оборудования в блоке оператора F_1 может быть передана математической модели объекта. Требуемые характеристики разностных сигналов обеспечиваются с помощью статического и динамического взвешивания.

Синтез формирователя разностей можно осуществить двумя способами: в пространстве состояний и с использованием соотношения вход—выход. В первом случае следует выделить методы, основанные на применении наблюдателя, и методы векторных соответствий. В качестве разности используется взвешенная ошибка оценивания выходного сигнала. Известен, например, подход с применением банка оценивающих устройств, настроенных на различные типы повреждений (контроль по группе гипотез). Метод векторных соответствий основан на выборе математических соотношений "вход—выход", связанных с избыточностью и приводящих к алгебраическим выражениям, объединяющим выходы датчиков.

Из уравнений (1) с момента времени $k-s$ до k при отсутствии повреждений получим следующее выражение избыточности:

$$\begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \dots \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \dots \\ \mathbf{CA}^s \end{bmatrix} \mathbf{x}(k-s) + \mathbf{H} \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \dots \\ u(k) \end{bmatrix},$$

где

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} \dots \dots \dots 00 \\ \mathbf{CB} \dots \dots \dots 0 \\ \dots \dots \dots \dots \\ \mathbf{CA}^{s-1} \mathbf{B} \dots \mathbf{CB} \quad \mathbf{CBD} \end{bmatrix}.$$

Вектор соответствий имеет вид

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{V} \left\{ \begin{bmatrix} y(k-s) \\ y(k-s+1) \\ \dots \\ y(k) \end{bmatrix} - \mathbf{H} \begin{bmatrix} u(k-s) \\ u(k-s+1) \\ \dots \\ u(k) \end{bmatrix} \right\}, \quad (5)$$

где разностная матрица \mathbf{V} в соответствии с (4) должна удовлетворять условию

$$\mathbf{V} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \dots \\ \mathbf{CA}^s \end{bmatrix} = 0.$$

Согласно теореме Кейли—Гамильтона при достаточно больших s такая матрица всегда существует. Минимальное значение s определяется пределами изменения индекса Кронекера. Очевидно, вектор $\mathbf{r}(k)$ равен нулю в случае исправной работы системы и отличен от нуля при повреждениях. Пусть $\mathbf{V} = [\alpha_s, \alpha_{s-1}, \dots, \alpha_1, \alpha_0]$ и $\mathbf{VH} = -[\beta_s, \beta_{s-1}, \dots, \beta_1, \beta_0]$, тогда выражение (5) можно записать в виде

$$\mathbf{r}(k) = \sum_{i=0}^s [\alpha_i y(k-i) + \beta_i u(k-i)]$$

или

$$\mathbf{r}(z) = \sum_{i=0}^s [\alpha_i z^{-i} \mathbf{y}(z) + \beta_i z^{-i} u(z)].$$

Это соотношение устанавливает рекуррентную связь между совокупностью сигналов $\{\mathbf{u}(z), \mathbf{y}(z)\}$ и разностью $\mathbf{r}(z)$. Метод векторных соответствий обладает меньшей гибкостью по сравнению с методами, основанными на применении наблюдателей, без каких-либо ограничений.

В случае использования соотношения "вход—выход" формирователь разностей синтезируется с помощью матрицы передаточных функций контролируемой системы подстановкой вместо F_1 передаточной функции системы выражения $\mathbf{G}_u(z)$. Избыточный сигнал, связывающий выходной сигнал и разность, представляет собой невязку между действительным и моделируемым выходом

$$\mathbf{r}_1(z) = \mathbf{y}(z) - \mathbf{G}_u(z)u(z). \quad (6)$$

Матрица передаточных функций примет вид

$$\mathbf{G}_u(z) = \mathbf{T}(z)/(\varphi(z)),$$

где $\mathbf{T}(z)$ — полиномиальная матрица по z^{-1} , $\varphi(z)$ — полином относительно z^{-1} . Тогда разность примет форму

$$\mathbf{r}_2(z) = \varphi(z)\mathbf{r}_1(z) = (\varphi(z)\mathbf{y}(z) - \mathbf{T}(z)u(z)).$$

Главным недостатком уравнения (6) является то, что для неустойчивой системы формирователь разностей также неустойчив. Для взвешивания предыдущих разностей можно использовать весовую матрицу $\mathbf{W}(z)$ согласно уравнению

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{W}(z)\mathbf{r}_i(z), \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

которое обеспечивает изоляцию повреждения и грубые характеристики. Для создания устойчивого формирователя разностей можно воспользоваться методом факторизации с помощью передаточной функции

$$\mathbf{G}_u(z) = \mathbf{M}^{-1}(z)\mathbf{N}(z),$$

где $\mathbf{M}(z)$ и $\mathbf{N}(z)$ — передаточные матрицы, реализуемые линейными устойчивыми системами. Окончательно получим

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(z) &= \mathbf{W}(z)\mathbf{r}_3(z) = \mathbf{W}(z)[\mathbf{M}(z)\mathbf{r}_1(z)] = \\ &= \mathbf{W}(z)[\mathbf{M}(z)\mathbf{y}(z) - \mathbf{N}(z)\mathbf{u}(z)]. \end{aligned}$$

Использование свободного наблюдателя при формировании разностей представляется достаточно простым, поскольку требуется только информация "вход—выход". Однако предлагаемый способ затруднен, если требуется внутренняя информация о состоянии системы.

Грубость моделей, основанных на диагностике повреждений

Очевидно, надежность схемы ОПИ должна превосходить надежность контролируемой системы. Основной проблемой на пути достижения прогресса и повышения надежности построения модели ОПИ является грубость относительно моделируемых неопределенностей. Это понятие означает степень независимости характеристик ОПИ от ошибок моделирования и неизвестных (неизмеряемых) возмущений. Если в процессе ОПИ используют точные модели и характеристики всех возмущений известны, то проблема грубости контролируемой системы представляется тривиальной. Однако на практике неопределенности при моделировании неизбежны. Повреждения и неопределенности оказывают влияние на разностные сигналы, но определить их воздействия в отдельности затруднительно. Задача разработчиков заключается в создании такой грубой системы ОПИ, которая гарантирует нечувствительность разностей к неопределенностям (грубость), но в то же время обеспечивает чувствительность к отказам.

Наиболее эффективным способом достижения грубости процесса ОПИ является разделение возмущающих воздействий. В этом случае все неопределенности рассматривают как составляющие возмущений, действующих на динамическую модель вида

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}_1\mathbf{d}(k) + \mathbf{R}_1\mathbf{f}(k);$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}_2\mathbf{d}(k) + \mathbf{R}_2\mathbf{f}(k).$$

Уравнение "вход—выход" можно записать в виде

$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z) + \mathbf{G}_d(z)\mathbf{d}(z) + \mathbf{G}_f(z)\mathbf{f}(z); \quad (7)$$

$$\mathbf{G}_d(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2,$$

где $\mathbf{E}_1\mathbf{d}(z)$, $\mathbf{E}_2\mathbf{d}(z)$ — неопределенности, действующие в системе; $\mathbf{d}(k)$ — неизвестные возмущения; \mathbf{E}_1 , \mathbf{E}_2 — известные матрицы возмущений (представлены столбцами). Это пример структурированной неопределенности. В некоторых случаях мат-

рица \mathbf{E}_2 представляется нулевой. Подставив $\mathbf{y}(z)$ из (7) в (2), получим

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_f(z)\mathbf{f}(z) + \mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_d(z).$$

Если формирователь разности удовлетворяет условию

$$\mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_d(z) = 0, \quad (8)$$

то возмущения в разностях разделяются, и разностные сигналы можно считать независимыми от возмущений. Если условие (8) не выполняется, то оптимальное решение ищется путем минимизации показателя качества, зависящего от возмущений и повреждений:

$$\hat{J} = \|\mathbf{H}_y(\mathbf{e}^{j\omega T})\mathbf{G}_d(\mathbf{e}^{j\omega T})\| / \|\mathbf{H}_y(\mathbf{e}^{j\omega T})\mathbf{G}_f(\mathbf{e}^{j\omega T})\|.$$

Минимизируя показатель \hat{J} в заданном частотном диапазоне, обеспечим соответствующее разделение. Здесь распределение матриц возмущений должно быть априорно известным. В общем случае структура неопределенности неизвестна, и задача грубости оказывается значительно сложнее. В этом случае систему можно представить в виде

$$\mathbf{y}(z) = \{\mathbf{G}_u(z) + \Delta\mathbf{G}_u(z)\}\mathbf{u}(z) + \{\mathbf{G}_f(z) + \Delta\mathbf{G}_f(z)\}\mathbf{f}(z),$$

а разностный сигнал записывается как

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\{\mathbf{G}_f(z) + \Delta\mathbf{G}_f(z)\}\mathbf{f}(z) + \mathbf{H}_y(z)\Delta\mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z).$$

Для неструктурируемых неопределенностей, описываемых величинами $\Delta\mathbf{G}_u(z)$ и $\Delta\mathbf{G}_f(z)$, очень трудно обеспечить грубость при формировании разностных сигналов. Один из путей решения этой задачи заключается в аппроксимации структуры неопределенности, например, выборе возмущений, отделенных от разностных сигналов.

Разработку методом формирования грубых разностных сигналов можно отнести к группе активных методов. При данном подходе влияние неопределенностей на разности минимизируется, а вместе с тем влияние повреждений на разности возрастает. Увеличения грубости ОПИ можно достичь на стадии принятия решения (пассивный способ). Ситуация, в которой целиком выполняются условия грубости при формировании разностных сигналов, встречается крайне редко по причине параметрических неопределенностей, действия возмущений и помех. В особенности это касается неструктурируемой неопределенности. Следовательно, необходимо обеспечить достаточную грубость не только на стадии формирования разности, но также и на стадии оценивания разности (шаг к принятию решения). Цель грубого оценивания разности заключается в возможности уверенного принятия решения в случае ложной тревоги (достаточно малом уровне появления тревоги). Этой цели можно добиться несколькими способами, например, посредством обработки статистических данных, осреднением,

корректированием или надлежащим выбором порога срабатывания.

Общий подход к принятию решения относительно повреждения заключается в определении нулевого порога, при котором сравниваются решающие функции. Обычно используют фиксированные пороги. Если решающий сигнал превышает порог, то регистрируется повреждение. При выборе фиксированного порога чувствительность к повреждениям будет снижаться, если порог выбран слишком большим, в то время как уровень ложной тревоги будет слишком большим, если порог выбран заниженным. Это является наиболее тонким моментом. При наличии неопределенностей в системе разностный сигнал флуктуирует с изменением входных сигналов даже в случае отсутствия повреждений. При выполнении маневров объекта эти изменения могут быть достаточно большими и не фиксируются порогом, который обеспечивает ОПИ при допустимом уровне ложной тревоги. Для повышения грубости в такой ситуации возможно использование порога, изменяющегося в зависимости от свойств объекта. Здесь проблема грубости связана с принятием решения в ситуации с неопределенными разностными сигналами. Успех процедуры ОПИ зависит от требуемого уровня толерантности и выбора адекватной модели динамической системы.

Заключение

В данной статье рассмотрены различные подходы к проблеме диагностики повреждений с помощью пространства соответствий. Было показано, что в большинстве случаев диагностики имеют дело с изоляцией специфических повреждений (отказов) и свойством грубости по отношению к неопределенностям. Свойство локализации связано, в основном, со структурой модели формирования разностных сигналов. Для этой цели было проведено сравнение различных методов формирования разностных сигналов. Упор делался на задачи, связанные с разработкой грубых формирателей разностей. При выборе стратегий формирования разностей благодаря свойству дуальности использовали

принципы построения наблюдателей состояния динамической системы и методы грубого управления. Проводили оценку реально действующих неопределенностей (структурируемых или неструктурируемых). В случае структурируемой неопределенности применяли принцип разделения в форме выбора собственной структуры системы или наблюдателя с неизвестным входным сигналом. Поиск общих идей, связанных с пространством соответствий, привел к необходимости разработки грубых методов. Важным моментом диагностики повреждений является простота структуры алгоритма формирования разностного сигнала для определения повреждения и его изоляции. Несмотря на общую постановку задачи — исследования в расширенном пространстве состояний, рассмотренные алгоритмы касались модели динамической системы только для случая "вход—выход" и измерения всех действующих сигналов.

Список литературы

1. Гришин Ю. П., Казаринов Ю. М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М.: Радио и связь. 1985. 176 с.
2. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Силаев А. В. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах // Автоматика и телемеханика. 1996. № 1. С. 3—20.
3. Заведеев А. И. Разработка алгоритмов для отказоустойчивых систем управления аэрокосмическими летательными аппаратами // Тр. VIII междунар. науч.-техн. семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации". Алушта. М.: Изд-во МАИ, 1999. С. 344—345.
4. Глинский В. А., Заведеев А. И., Моисеенко В. Е. Разработка отказоустойчивых алгоритмов для аэрокосмических систем с применением принципов идентификации и аналитической избыточности // Тр. IX междунар. науч.-техн. семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации". Алушта. М.: Изд-во Научтехлитиздат, 2000. С. 335—337.
5. Глинский В. А., Заведеев А. И., Моисеенко В. Е. Алгоритмическое обеспечение отказоустойчивых аэрокосмических систем на базе принципов функционального резервирования и реконфигурации // Тр. X междунар. науч.-техн. семинара "Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации". Алушта. М.: Изд-во МИФИ; 2001. С. 235—236.
6. Глинский В. А., Заведеев А. И., Моисеенко В. Е. Разработка методов проектирования отказоустойчивых систем управления и навигации аэрокосмических летательных аппаратов на базе принципов функционального резервирования и реконфигурации // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 4. С. 35—38.

ИНФОРМАЦИЯ

С 2 по 9 сентября 2011 г.
в пос. Дивноморское (Краснодарский край, Геленджик) состоится

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ СИСТЕМАМ и ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ (IS & IT'11)

Председатель оргкомитета: проф. В. Г. Захаревич (Ростов-на-Дону);
Зам. председателя оргкомитета: проф. В. В. Курейчик (Россия, Таганрог).

Контактная информация:

E-mail: vkur@tsure.ru, nev@tsure.ru, kur@tsure.ru, ivr@tsure.ru
Телефоны: 8634-37-16-51, 8634-39-32-60, 8634-38-34-51 **Факс:** 8634-31-14-87
<http://icai.tsure.ru/stepl.asp?lang=ru>

М. В. Желамский,
канд. техн. наук, вед. специалист,
ЗАО "Транзас-Авиация"¹

Магнитный датчик положения и ориентации с шестью степенями свободы для управления подвижными объектами

Рассмотрена задача задания координат при управлении подвижными объектами. Предложена новая технология, основанная на активном магнитном позиционировании подвижного объекта по шести степеням свободы. Описан действующий макетный образец системы позиционирования, моделирующий задание координат свободным движением руки. Представлены фотографии компонентов и спецификация действующей системы магнитного позиционирования в режиме управления. Даны перспективные предложения по применению новой системы позиционирования на транспорте, в компьютерных технологиях, в медицине.

Ключевые слова: координаты, управление, магнитное поле, генератор поля, подвижный приемник

Задача позиционирования подвижного объекта

Мгновенное расположение подвижного объекта в свободном пространстве характеризуется линейным положением и ориентацией — поворотами объекта относительно ортогональных осей системы координат на углы Эйлера — азимут, угол места и крен. Таким образом, как показано на рис. 1, набор из шести координат однозначно определяет текущее место и ориентацию подвижного объекта.

При этом сам подвижный объект характеризуется шестью степенями свободы (6DOF — degree of freedom), соответствующими перечисленным координатам.

Известен обширный класс задач, в которых оператор управляет положением и ориентацией подвижного объекта с помощью устройств, задающих требуемые значения координат. Так, например:

- водитель автомобиля выбирает направление движения с ис-

¹ Инициализация проекта, нахождение основных научно-технических решений, практическая реализация до уровня действующего макета и получение основных результатов выполнены в рамках инициативного проекта "МАИТЕХ" (Магнитные Инструментальные Технологии) в период 1990—2011 гг. Анализ и систематизация результатов, выразившиеся в подготовке к печати монографии "Электромагнитное позиционирование подвижных объектов", проведены в ЗАО "Транзас-Авиация".

- пользованием руля — датчика углового положения, а скорость движения — с помощью педали акселерометра — датчика линейного положения;
- пилот современного самолета управляет направлением полета, используя функциональную ручку с двумя степенями свободы, применяемую также и на многочисленных тренажерах;
- управление современными конструкторскими пакетами (Solid Works, ACAD, PCAD и др.) в компьютере осуществляется с помощью 2D-мыши, определяющей положение визира на плоском экране монитора; большая часть компьютерных игр использует джойстик;
- управление роботами, моделями летательных аппаратов, включая беспилотные (БПЛА), осуществляется с помощью 2D-пультов с отдельным управлением координатами.

Преимущества описанных 2D-устройств задания координат состоят в простоте, линейности и независимости координат. Недостатками являются ограничение числа задаваемых координат, привязанность к столу или корпусу прибора, ограничение функциональных возможностей оператора. Стандартная компьютерная мышь не позволяет совместно с основными координатами управлять также глубиной, высотой, масштабом; перенос и поворот объекта одновременно невозможен. Нельзя также одновременно работать с клавиатурой и мышью или джойстиком. Таким образом, перечисленные органы управления соответствуют прошлому веку развития техники и не отражают прогресса, происходящего в современных мехатронных технологиях.

Устранить описанные недостатки позволяет подход, формулируемый в общем виде следующим образом:

- необходимо дать оператору в руки малый подвижный предмет, легко моделирующий движе-

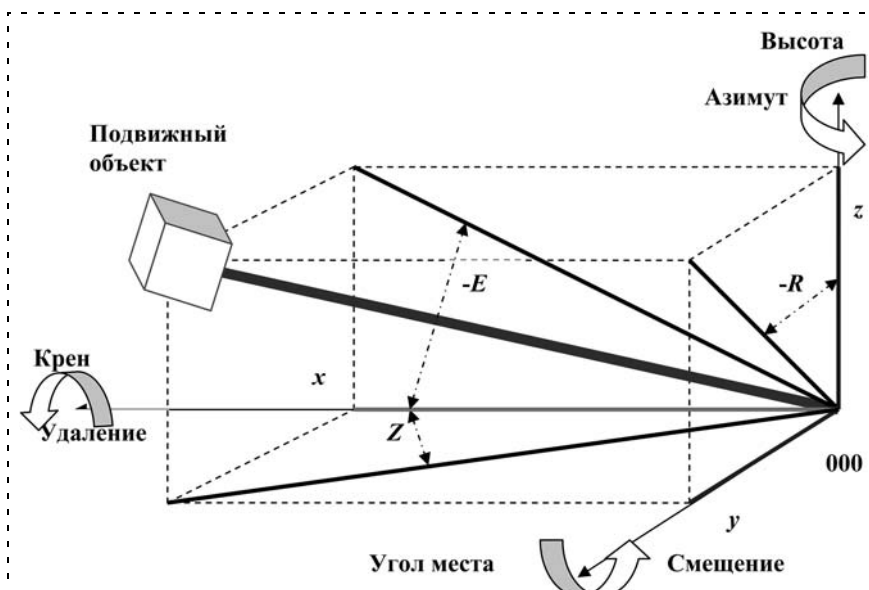


Рис. 1 Система координат для подвижного объекта в свободном пространстве: x, y, z — линейные координаты (удаление, смещение, высота); Z, E, R — углы Эйлера (азимут — правый поворот вокруг оси z , угол места — вокруг y , крен — вокруг оси x)

ние объекта управления по шести степеням свободы. В качестве предмета может выступать любое подходящее изделие по выбору оператора — от дамской сумочки до собственной свободной руки;

- затем нужно лишь определять полный набор текущих координат выбранного предмета в реальном времени и передавать их объекту управления в качестве управляющих сигналов.

В такой постановке речь идет о прямой задаче позиционирования — определении координат произвольного подвижного предмета по его положению и ориентации. Решение поставленной задачи должно заключаться в данном случае в разработке локального прибора — датчика позиционирования, определяющего полный набор координат подвижного предмета, находящегося в руках оператора и преобразующего их в электрические аналоги для передачи в систему регулирования реального объекта. Исходя из размеров человека и общефизических соображений можно отметить, что дальность действия такого прибора должна быть не более 1 м от оператора.

Новая технология активного магнитного позиционирования подвижного объекта

Известны методы позиционирования подвижных объектов на указанных дальностях, изложенные в работах [1—8]. Там же показано, что оптимальным для поставленной задачи является использование метода активного магнитного позиционирования, имеющего неограниченные диапазоны углов, минимум оборудования, возможность позиционирования через непрозрачную преграду, относительно высокую частоту обновления информации, минимальное влияние интерьера и окружающей среды.

Активное магнитное позиционирование (МП) — новая наукоемкая технология, включающая следующие основные процедуры:

- генерирование магнитного поля с известным пространственным распределением в зоне перемещения подвижного объекта;
- измерение компонент рабочего магнитного поля подвижным приемником, связанным с объектом позиционирования;
- сравнение измеренных полей с вычисленными значениями для предполагаемых координат подвижного приемника;
- определение действительных координат путем итерационного уточнения предполагаемых значений.

Известны зарубежные примеры применения МП в авиации, в медицине, направленном бурении, в анимации, в виртуальной реальности и др. Отечественная промышленность не выпускает магнитные трекеры ни для одной из перечисленных областей применения. Прогресс, достигнутый в РФ к настоящему времени в разработке оборудования для МП, например, для целеуказания и биомеханики, описан в работах [5, 8]. В настоящее время

готовится к опубликованию первая в России монография по теории МП.

В данной статье рассматривается возможность применения новой технологии МП для управления исполнительными устройствами, исключая задачу нашлемного целеуказания, уже описанную в других работах [1, 2, 8].

Известны три способа МП, отличающиеся характером генерируемого магнитного поля:

- АС (от английского "Alternating Current") — метод [9], при котором одновременно генерируются несколько магнитных полей синусоидальной формы на разных частотах;
- DC (от английского "Direct Current") — метод [10], отличающийся генерированием последовательности импульсного магнитного поля чередующейся ориентации;
- АDC (от английского "Alternating — Direct Current") — метод [4], основанный на генерировании двухполярных импульсов магнитного поля.

Особенности известных методов позиционирования детально описаны в указанных работах, а в данной статье рассмотрен последний, наиболее эффективный метод, который составляет суть отечественной технологии МП, позволяющей успешно решать поставленную задачу.

Как показано на рис. 2, система МП включает: генератор магнитного поля (ГМП) 1, подвижное измерительное устройство (УИП) 2, контроллер 3, интерфейс 4, вычислитель 5. Неподвижный ГМП предназначен для генерирования магнитного поля заданной формы, которое измеряется приемником УИП, зафиксированным на подвижном объекте. Сигналы с УИП передаются на интерфейс, где преобразуются в коды, и поступают в вычислитель. Контроллер управляет работой всей системы. Вычислитель служит для решения трех задач в реальном времени — управления системой, измерения

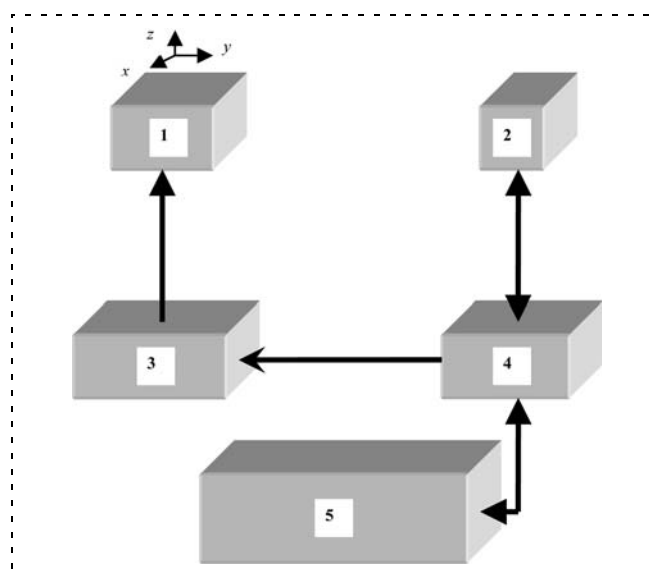


Рис. 2 Структурная схема системы МП

магнитных полей, вычисления координат УИП в системе координат фиксированного ГМП. Итерационное уравнение нахождения координат имеет вид:

$$x^k = x^{k-1} + \text{step} \cdot \text{grad}F,$$

где x^k — текущий вектор координат; x^{k-1} — вектор координат, действовавший на предыдущем шаге (начальное приближение); step — шаг итерационного процесса, определяющий скорость схождения оптимизационного процесса; gradF — градиент подлежащей минимизации целевой функции

$$F = \sum_{i=1}^n (B_{mi} - B_{ci})^2,$$

здесь B_{ci} — независимые измерения генерируемого магнитного поля; B_{mi} — расчетные значения магнитных полей, соответствующие сделанным независимым измерениям; n — число независимых измерений, используемых в системе МП.

Магнитное поле Земли векторно складывается с генерируемым рабочим полем, что вызывает необходимость компенсации его влияния. Наличие электропроводящего немагнитного металла в интерьере, окружающем систему, не влияет на ее работу за счет оптимального выбора длительностей импульсов поля. Влияние магнитного стационарного металла устраняется калибровкой. Наличие подвижного магнитного металла значительных размеров влияет на точность позиционирования только при его нахождении на линии между ГМП и УИП. Мелкие детали масштаба крепежных элементов оказывают при этом пренебрежимо малое влияние.

Разработка и исследование макетного образца системы МП

Для реализации нового способа разработан и изготовлен научный макет, позволяющий моделировать различные применения системы магнитного позиционирования [5, 8]. В данной статье описаны результаты, полученные на макете при исследовании режима задатчика координат управляемого подвижного объекта.

На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) показан ГМП, выполненный в виде куба. УИП в изолирующем корпусе не содержит напряжений выше 12 вольт. Как ГМП, так и УИП подключены к стационарному оборудованию системы. Мягкий кабель от УИП имеет диаметр не более 4 мм и не ограничивает свободу его перемещения. Установочные места на УИП позволяют закрепить его на руке, на голове оператора. ГМП может быть скрыт под столом или за немагнитной перегородкой. Стандартный компьютер и контроллер не показаны. В реализованной конфигурации все программные задачи реализованы на одном вычислителе персонального компьютера. Габаритные размеры контроллера в действующем макете составляют малую долю от объема

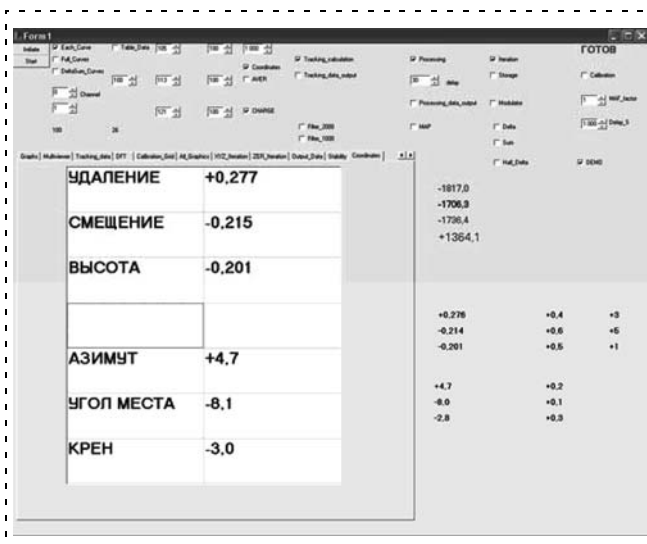


Рис. 5 Выходной интерфейс макета с выходными координатами

системного блока персонального компьютера и могут быть уменьшены под конкретную задачу.

На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) показаны две системы координат — фиксированная система координат генератора поля $X_0 Y_0 Z_0$, в которой вычисляются координаты подвижного объекта, и подвижная система координат приемника x_m, y_m, z_m . Процесс позиционирования сводится к сопровождению координат УИП, находящегося в руке оператора, в системе $X_0 Y_0 Z_0$. Можно наращивать число УИП при одном ГМП.

На рис. 5 на фоне вспомогательной информации аппаратно-программного комплекса макетного образца системы МП показаны выходные данные, выводимые на монитор в реальном времени. Линейные координаты даны в метрах, углы — в угловых градусах.

Спецификация системы МП в режиме 6DOF-задатчика координат

- Дальность функционирования (расстояние между ГМП и УИП), м ≥ 1
- Амплитуда рабочего поля в рабочей зоне не превышает магнитного поля Земли
- Диапазон функционирования, °:
 - по азимуту и крену ± 180
 - по углу места ± 90
- Выход системы:
 - 6 координат УИП в системе координат ГМП;
 - 10 цифровых ГТЛ-сигналов, соответствующих попаданию УИП на заранее заданные "пятна" координат
- Среднеквадратическое отклонение (СКО) вычисляемых линейных координат, мм на 100 измерений 0,5
- СКО вычисляемых углов ориентации, ° на 100 измерений 0,2
- Частота смены выходных данных, Гц 25; 50; 100

- Габаритные размеры генератора магнитного поля, мм 100 × 100 × 100
- Габаритные размеры подвижного приемника, мм 26 × 36 × 50
- Потребляемая мощность (кроме компьютера), Вт 100
- Задержка — менее одного периода смены выходных данных.

Разработанная технология открывает новые возможности построения систем управления для большого числа применений.

Можно представить транспортное средство без руля и педалей. Любой удобный предмет в руках водителя с установленным подвижным приемником может управлять направлением движения. Линейное перемещение рук водителя может устанавливать скорость движения. Приемники на ногах с успехом заменят педали акселератора, тормоза, сцепления. Поскольку водитель смотрит на край дороги в процессе движения, то в перспективе не исключается определение линии визирования взгляда водителя для управления направлением движения автомобиля. Руки водителя при этом окажутся свободными для реализации других важных функций.

Самолет без ручки управления — вопрос будущего. Но уже сейчас реально разработанная система может быть применена для объективной записи движений пилотов в целях повышения безопасности полетов. На многочисленных тренажерах разработанная система может быть применена для контроля движений обучаемого персонала. Повысится эффективность управления БПЛА с помощью описанной системы.

Компьютерная мышь с шестью степенями свободы позволит повысить эффективность проектирования, управления компьютерными играми, повысит их рыночную привлекательность.

Системы безопасности, построенные на описанном принципе, найдут применение в различных областях. Например, мониторинг направления линии визирования дороги даст возможность контроля засыпания водителя на полномасштабных транспортных средствах.

Выходной интерфейс позволяет уже сейчас осуществлять тренировку двигательной активности больных в ходе реабилитационных медицинских программ. Пациент с приемником на руке сможет совершать заданные движения, наблюдая достижение нужных координат на экране монитора.

Кроме того, описанный интерфейс позволяет оператору выполнить самое быстрое позиционирование, время которого определяется только реакцией человека.

Современный оператор, управляющий сложным технологическим оборудованием не только на транспорте, но и в промышленности, получит новый арсенал средств в виде подвижных приемников на

руках, ногах и голове, расширяющих его функциональные возможности.

Таким образом, возникает реальная перспектива организации адекватного, физического, независимого по координатам управления технологическим оборудованием, транспортными средствами и подвижными механизмами с использованием свободных движений оператора.

Выводы

- Предложена концепция управления исполнительными устройствами, основанная на применении технологии МП подвижных объектов. Концепция открывает новое направление в построении систем управления и регулирования механизмами и аппаратами.
- Создана и развивается новая отечественная технология МП. Решена важная научно-техническая проблема создания первого прототипа отечественной системы МП. Технология готова к промышленному освоению.
- Автомобильный руль, штурвал самолета, компьютерная мышь, педали и рычаги уходят в историю при внедрении предложенной системы. Описанные перспективы являются вопросами ближайшего будущего.

Работа выполнена в рамках инициативного проекта "МАИТЕХ" (Магнитные Инструментальные Технологии). Автор выражает благодарность группе компаний "Транзас" за содействие в продвижении работы. Наталье Поляковой выражается признательность за поддержку проекта. Духовное окормление осуществлял священник Владимир Флавыанов, настоятель храма св. кн. Владимира, что в Усть-Долыссах.

Список литературы

1. Желамский М. В. Магнитное позиционирование в наשלменных системах // Электроника: НТБ. 2006. НТБ. № 7.
2. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование — преимущества и области применения // Электроника: НТБ. 2007. № 3.
3. Желамский М. В. Магнитное позиционирование в системах виртуальной и дополненной реальности // Электроника: НТБ. 2007. № 5.
4. Желамский М. В. Заявка на изобретение № 2008136343 "Способ определения линейного положения и ориентации подвижного объекта" от 09. 09. 2008 г. Решение о выдаче патента от 05 августа 2010 г.
5. Желамский М. В. Первая отечественная система магнитного позиционирования в полном объеме технических требований // Датчики и системы. 2009 № 1.
6. Желамский М. В. Глобальная система виртуальной и дополненной реальности для закрытых пространств // Датчики и системы. 2009. № 7.
7. Желамский М. В. и др. Новый метод позиционирования бурльного инструмента, основанный на отечественной магнитной технологии // Инженер-нефтяник. 2009. № 3.
8. Желамский М. В. Первая отечественная система магнитного позиционирования для целеуказания // Датчики и системы. 2010. № 2.
9. URL: <http://www.polhemus.com/>
10. URL: <http://www.ascension-tech.com/>

CONTENTS

- Parsheva E. A., Lezhnina Yu. A.** Robust Decentralized Control with Reference Model of Non-Linear Plants Multilinked for Disturbances Compensation 2
The problem of robust control by input for the multilinked non-linear plant is researched. The simple robust algorithm with compensation for disturbances with preset accuracy in finite time are used for obtain of problem solution. Thus, for formation of managing effects no used measuring variable of other local subsystems, i. e. it is executed completely decentralized control.
Keywords: robust system, multilinked plant, reference model, decentralized law, auxiliary block, compensation for disturbances
- Andreev V. P.** Omnidirectional Computer Vision System for Vision-Guided Navigation of the Mobile Robot 8
The problem considered in the article is about estimation of omnidirectional computer vision sensor for vision-guided navigation of an autonomous mobile robot. The panoramic view is ensured by installation of a mirror cone into the optical system. This cone forms images on a photo matrix of any standard television camera. Algorithms of detection and localization of special objects (IR-beacons) in a panorama scene are described. These algorithms are based on the use of the frame-to-frame difference. The purpose of this research is to develop and refine the algorithms of video data processing and forming the control goal by means of the onboard system of a mobile robot.
Keywords: computer vision system, autonomous mobile robots, analysis of video data, frame-to-frame difference, mirror cone
- Babayan P. V., Gavrilov A. N.** The Application of Technical Vision Systems in Automatization of of Reed Switches Production 15
The machine vision approaches to the automation of the assembly and packaging operations in the production of reed switches are considered. The proposed decisions supply the ensured optical inspection and correction of the position of the reed switch contacts. The models for the study of the effectiveness of the presented approaches are developed. The modeling results are also presented.
Keywords: reed switch, manufacturing operation, contact position estimation, technical vision system, optical-electronic inspection, photodetector signal recognition, logical analyzer, image sensor, image processing
- Sharshenaliev Zh. Sh., Brjakin I. V.** Inertial Sensors with the Electromagnetic Positioning 20
For the decision vibrometry of problems new construction principles of the inertial sensors, based on use of flux-gate magnetometer properties with electromagnetic positioning are offered. Variants of original designs of such sensors are presented and features of their functioning are considered.
Keywords: vibratijn-based diagnostics, the inertial sensors, inert weight, induction array, elastic suspension, flux-gate magnetometer, a sensitive element
- Epishkin A. E., Shestakov V. M.** The Ways of Overcoming of the Electromechanical Resonance in Vibrating Machines 26
The way of overcoming of an electromechanical resonance (Sommerfeld effect) for multirotored vibrating machines by means of antiphase debalances rotation is offered. The adequate mathematical description of electromechanical system four-rotored vibration machines is created, the imitating modelling of the starting modes which have confirmed efficiency of developed algorithms of management is executed.
Keywords: vibrating installations, mechanical resonance, Sommerfeld effect, electromechanical systems, ways of management
- Kosenok B. B.** Analytical Decisions of the Spatial Vector Contours, Necessary for Kinematic Research of Lever Mechanisms 30
In given clause substantive provisions of the theory of vector modelling, classification of vector contours (modules) and the analytical decisions received by the author for two vector spatial modules are resulted. Vector modelling allows to solve effectively problems of the kinematic and dynamic analysis and synthesis of mechanisms, as before created, and again created.
Keywords: mechanisms, management, a vector, a contour, model, modules, analytical decisions, kinematics
- Pritykin F. N.** Methods and Technologies of Virtual Modeling of the Motion Adaptive Industrial Robot with of Use on Features of the Computer Graphics 34
It is Stated generalized method, allowing realizes the generation of the models of open kinematics of the chains mechanism manipulator facility features of the computer graphics. The executive mechanisms herewith have a complex structure, free number of the degrees of the nobilities and are presented in the manner of constellations three-dimensional primitive. The analysis of the displacement section robot possible for the arbitrary degree of motor redundancy at building of the small motion by vector of the velocities.
Keywords: virtual modeling of the motion robot, adaptive management motion robotic of the systems, syntheses of the motion by vector of the velocities

- Basyrov A. G., Lebedev D. M., Mastin A. B.** Energy Saving Information Technology Configuring Board Computer System Spacecraft 42
The method configure the onboard computing system of spacecraft, directed on increase of power efficiency of parallel processing of the information in the on-board control system is considered. The examples illustrating possibilities of the organization of power saving up parallel computing processes are resulted.
Keywords: the computing system, configuration, power consumption, power savings
- Ignatov N. A.** Implementation of Energy Efficiency Concept Based on Non-Regulated Market of Electric Energy Parameters Forecast in Automated Control Systems 48
This article suggests implementation of energy efficiency concept based of Russian Federation non-regulated market of electric energy parameters forecast in automated control systems.
Minimum mean square error forecast is performed with integral equation of Wiener—Kolmogorov, which allows computation of weight function of optimal extrapolator, and periodically correlated stochastic process model.
Keywords: energy efficiency, forecast, extrapolation, periodically correlated stochastic process, non-regulated market of electric energy
- Lukjanov D. V., Ivaschenko V. A.** Reconfiguration of the Structures of Electrical Networks Due to Power Failure in the Industrial Enterprises 55
The task of reconfiguring the structure of electrical networks due to power failure in the industrial enterprises is posed. Power failures are caused by power shortages in electric power system and by accidents in power plants. Also, known methods and algorithms for its solution are considered.
As a result, a heuristic algorithm for solving the problem is proposed, it is ensured rapid recovery of power supply enterprises.
Keywords: reconfiguration of the structures of electric networks of industrial enterprises, methods and algorithms for the reconstruction of enterprises power supply
- Insarov V. V., Shcherbenev A. C.** Technique of Computer Modelling of Thermal Fields of Typical Objects Land Scenes. 61
In article the technique of computer modelling of thermal fields of objects of land scenes, mathematical model of typical object, algorithm of a numerical method of the decision with boundary conditions on the external and internal surfaces, considering radiant and convective heat exchange on these surfaces for various conditions of an environment are presented. The block diagramme of the computer program and results of computer modelling of thermal fields of typical object (chimney) are resulted.
Keywords: thermal fields of object; mathematical models; a technique of computer modelling of thermal fields of object
- Zavedeyev A. I.** Principles of Building of Aerospacecraft Failurestable Attitude Control Systems 69
Different principles of building of aerospacecraft failurestable attitude control systems are considered. The comparison of different methods of synthesis of robust different signal formulalor is carry out with effect structural and unstructural uncertainties.
Failure diagnostic algorithms using equations "check on conformity " are proposed.
Keywords: aerospacecraft, attitude control system, diagnostica failure, damage, monitoring algorithm, difference formulator.
- Zhelamskiy M. V.** Six Degree of Freedom Magnetic Sensor to Control by the Mobile Objects 75
The problem to control by the mobile objects is considered. The new technology is proposed basing on active magnetic tracking of mobile object with six degree of freedom. The model sample of magnetic tracker is described, which is modeling the coordinates input by the free hand movements. Both the pictures of parts and specification are given for the operating magnetic tracking system in control mode. The forward-looking proposals are given on the application of new positioning system in transportation, computer technology, in medicine.
Keywords: coordinates, controlling, magnetic field, field generator, portable receiver

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *М. Г. Джавадян.*

Сдано в набор 31.03.2011. Подписано в печать 18.05.11. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,84. Заказ 373. 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