

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 7 (112)

ИЮЛЬ

2010

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Краснощеченко В. И. Теоретико-групповой подход к синтезу регуляторов нелинейных аффинных систем на примере управления перевернутым маятником 2

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах. Часть. 1. Основы агентного подхода. 11
Андреев М. В., Иващенко А. В., Мартышкин Д. М., Скобелев П. О., Уланова Л. В., Царев А. В. Применение мультиагентных технологий динамического планирования персональных задач при организации коллективного взаимодействия в автоматизированных системах управления распределением ресурсов 21
Осипов В. Ю. Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных системах 27
Филимонов А. Б., Покровский Я. О. Электронная паспортизация в системах интеллектуального управления техническим состоянием промышленного оборудования 32

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Управление параллельной работой синхронных генераторов с квазиастатическими внешними характеристиками в полярной системе координат 35
Кривилев А. В. Математическое описание цифровой системы управления мехатронного модуля привода с трехфазным вентильным двигателем 40
Бобырь М. В., Титов В. С. Метод коррекции параметров режима резания в системах с ЧПУ 49
Лебедев Г. Н. Постановка задачи оптимального управления технологическими процессами для обеспечения динамической устойчивости промышленного производства в кризисных ситуациях 53
Щербаков В. С., Корытов М. С., Григорьев М. Г. Синтез алгоритма автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины 56

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Лебедев Г. Н., Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е. Управление авиационной системой, находящейся под стохастическим влиянием метеофакторов 65
Борисенко Ю. Г., Володина Л. А., Касьянов И. Ю., Кузнецов А. Г. Основные принципы унифицированного построения трактов автоматического управления полетом самолета на режиме "Уход на 2-й круг" 69
Кербер О. Б., Мазур В. Н., Цатурян К. Т. Особенности автоматизации посадки самолетов гражданской авиации по категории III ICAO 76
Contents 79

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

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

УДК 62.50, 517.9, 512

В. И. Краснощеченко, канд. техн. наук, доц.,
Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,
kviip@yandex.ru

Теоретико-групповой подход к синтезу регуляторов нелинейных аффинных систем на примере управления перевернутым маятником¹

Рассмотрен синтез алгоритма управления перевернутым маятником на колесной паре на основе метода модельного прогнозируемого управления с грамиановзвешиванием, в котором используется декомпозиция нелинейных дифференциальных уравнений объекта управления. Представлены методика синтеза, условия сходимости алгоритма и результаты моделирования при движении перевернутого маятника по кругу. Показаны робастные свойства предложенного регулятора к возмущениям.

Ключевые слова: декомпозиция дифференциальных уравнений, группы Ли, нелинейные аффинные системы, метод модельного прогнозируемого управления, синтез регуляторов, грамиан управляемости

Введение

Разработка алгоритмов управления динамически устойчивыми мобильными роботами является одной из важных современных задач управления [1–4]. Обычные, статически устойчивые мобильные роботы имеют в общем случае громоздкую и тяжелую базу, которая обеспечивает низкий центр тяжести, делая их при этом неповоротливыми при движении в ограниченном пространстве. Напротив, мобильные роботы с динамически устойчивой схемой (в форме обратного маятника на колесной паре) обладают высокой маневренностью, имеют малую базу и могут развернуться практически на месте. Однако модель такого робота является нелинейной, имеет высокий порядок и векторное управление. В настоящее время, как правило, ограничиваются линеаризованной моделью [1–3], что заметно сужает функциональные возможности робота. В данной статье рассматривается комплексный подход к решению данной проблемы: теоретико-групповая методология дает возможность декомпозировать нелинейные дифференци-

альные уравнения, а метод модельного прогнозируемого управления с грамиановзвешиванием позволяет синтезировать необходимое управление. В качестве подтверждения эффективности предлагаемого алгоритма рассматривается управляемое движение мобильного робота по круговой траектории с компенсацией возмущений.

Теоретико-групповая декомпозиция нелинейной динамической системы

Впервые вопросы декомпозиции нелинейных дифференциальных уравнений с теоретико-групповой точки зрения были рассмотрены К. Ченом (К. Т. Chen) [5] в начале 60-х годов прошлого века. В последующем эта тема сохранила свою теоретическую направленность, а изменения касались лишь новых форм доказательства (см., например, [6]), но конструктивного решения для практического применения декомпозиции найдено не было. В работе автора [7] представлены результаты теоретических исследований по декомпозиции дифференциальных уравнений с последующим использованием метода модельного прогнозируемого управления для синтеза алгоритмов управления нелинейными аффинными системами [8], а в статье [9] — методика приближенного синтеза управления в задаче быстрогодействия для линейных объектов.

Рассмотрим нелинейную динамическую систему вида

$$\dot{x}(t) = X(x(t)) + Y(x(t)), x(0) = x, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} X(x) &= (\xi_1(x) \dots \xi_n(x))^T; \\ Y(x) &= (\eta_1(x) \dots \eta_n(x))^T \end{aligned} \quad (2)$$

— векторные поля в *координатной* форме. Эти же векторные поля, рассматриваемые как *дифференциальные операторы для гладких функций*, определенных на многообразии M (пространстве состояний системы (1)), имеют вид

$$x = \sum_{i=1}^n \xi_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}; \quad y = \sum_{i=1}^n \eta_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}. \quad (3)$$

Нетрудно найти связь между представлениями (2) и (3), а именно,

$$\xi_i(x) = \chi x_i; \quad \eta_i(x) = \gamma x_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (грант № 09-01-97531).

С групповой точки зрения операторы (3) называются инфинитезимальными (бесконечно малыми) преобразованиями (действиями) соответствующих однопараметрических групп

$$x_t = e^{tX} = e^{tL_x} = \exp(tX);$$

$$y_t = e^{tY} = e^{tL_y} = \exp(tY),$$

где L_x, L_y — дифференцирование (производная) Ли. Если в уравнении (1) имеется только **одно** векторное поле, тогда его решение можно найти из уравнения Ли:

$$x_i(t) = x_t x_i, (x_i(t) = y_t x_i), i = 1, \dots, n.$$

Проблема нахождения решения имеет место при наличии двух и более векторных полей. Для этого случая предлагается теорема о декомпозиции дифференциального уравнения (1) и композиции решений.

Теорема 1 [7, 8]. Пусть x_t, y_t — однопараметрические группы преобразований для векторных полей X, Y соответственно. Тогда решение уравнения (1) можно получить в виде композиции решений:

$$I. \dot{z}(t) = Zz = (e^{tL_x} Y)z; z(0) = x \quad (4)$$

(в задачах управления уравнение (4) используется для нахождения управляемой орбиты, где Y — управляемое векторное поле)

$$II. x(t) = x_t z(t) = x_t x|_{x=z(t, x)}$$

— общее решение исходного уравнения (1).

Алгоритм синтеза управления на основе теоретико-группового подхода и метода модельного прогнозируемого управления

Метод модельного прогнозируемого управления (МПУ) в сочетании с аппроксимацией присоединенного представления однопараметрических групп и взвешенным проектированием позволяет спроектировать регулятор для многомерной аффинной системы управления вида

$$\dot{x}(t) = X(x(t)) + \sum_{i=1}^m u_i(t) Y_i(x(t)), x \in M, u \in R^m. (5)$$

Поэтапно алгоритм синтеза управления выглядит следующим образом.

1 шаг. Составление и приближенное аналитическое решение системы уравнений управляемой орбиты на интервале прогноза движения.

Уравнение для нахождения управляемой орбиты имеет вид

$$\dot{z}(t) = \tilde{Y}(z, u; t) = \sum_{j=1}^m u_j(t) e^{tL_x} Y_j(z),$$

$$z(0) = x(0) = x,$$

т. е. это нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение. В последнем уравнении

$(e^{tL_x} Y_j(z))_i = e^{tL_x} y_{jz_i}, i = 1, \dots, n$. Это значит, что

$e^{tL_x} Y_j(z)$ — координатная запись векторного поля

$e^{tL_x} Y_j$, рассматриваемого как дифференциальный оператор. Отметим, что $L_X Y(z) = [X, Y](z)$,

$L_X^2 Y(z) = [X, [X, Y]](z)$ и т. п., т. е. производная Ли

$L_X Y(z)$ векторного поля $Y(z)$ вдоль векторного поля $X(z)$ может выражаться через скобки Ли

$$[X, Y](z) = \frac{\partial Y(z)}{\partial z} X(z) - \frac{\partial X(z)}{\partial z} Y(z).$$

Рассмотрим некоторый интервал прогноза движения системы $t_s = N_s h$, где $h = \Delta t$ — шаг постоянства фактически применяемого управления, в дискретных системах — шаг дискретизации. Обозначим

$t_u = N_u h$ — интервал постоянства прогнозируемого управления, т. е. $u(t) = \bar{u}_k, \forall t \in [t_k, t_k + t_u], k = 0, 1, 2, \dots, N - 1; t_0 = 0$. Примем $t_u = t_s$. Проводя аппроксимацию векторного поля $\tilde{Y}(x_k, \bar{u}_k; t)$ с помощью

конечного ряда (число членов разложения k_1), можно получить на каждом интервале прогноза $[0, t_s]$

аналитическую связь аппроксимации управляемой орбиты $\hat{z}(t)$ и состояния $x(t_k) = x_k$:

$$\hat{z}_i(x_k, \bar{u}_k, t) = (x_k)_i + \sum_{j=1}^m (\bar{u}_k)_j f_{ij}(x_k; t),$$

$$i = 1, \dots, n, t \in [0, t_s]; (x_k)_i = x_i(t_k); \quad (6)$$

$$(\bar{u}_k)_j = \bar{u}_j(t_k), f_{ij}(x_k; t) = \sum_{i=0}^{k_1} \frac{t^{i+1}}{(i+1)!} L_X^i Y_j(x)|_{x=x_k},$$

где выражение для орбиты (6) получено интегрированием

$$\dot{z}(x_k, \bar{u}_k, t) = x_k + \sum_{j=1}^m (\bar{u}_k)_j \int_0^t \sum_{i=0}^{k_1} \frac{s^i}{i!} L_X^i Y_j(x) ds =$$

$$= x_k + \sum_{j=1}^m (\bar{u}_k)_j \sum_{i=0}^{k_1} \frac{t^{i+1}}{(i+1)!} L_X^i Y_j(x), \quad (7)$$

$$t \in [0, t_s], x = x_k = x(t_k).$$

Полученная формула (7) говорит о том, что на небольшом интервале движения системы $t \in [0, t_s]$ мы предполагаем, что действие однопараметрических подгрупп группы Ли является инфинитезимальным и фактически совпадает с инфинитезимальным действием ее алгебры Ли в окрестности единицы группы. Иными словами, предполагается, что на этом интервале движения система *остается* в касательном пространстве TM_x точки x многообразия состояния M (т. е. $x(t) \in TM_x, \forall t \in [0, t_s]$).

2 шаг. Составление и приближенное аналитическое решение исходной системы уравнений на интервале прогноза движения объекта.

Общее решение дифференциального уравнения (5) имеет вид

$$x_i \hat{z}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t) = x_i x_i |_{x_i = \hat{z}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t)}, i = 1, \dots, n, \quad (8)$$

где x_i — однопараметрическая группа (фазовый поток) неуправляемого векторного поля x . Если векторное поле x нелинейное, то проводя аппроксимацию ряда Ли (8) конечным рядом (число членов разложения k_2), получим

$$\begin{aligned} \hat{x}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t) &= e^{tL_x} x_i |_{x_i = \hat{z}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t)} = \\ &= \sum_{i=0}^{k_2} \frac{t^i}{i!} x^i x_i |_{x_i = \hat{z}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t)} = \\ &= a_i(\mathbf{x}_k; t) + \sum_{j=1}^m (\bar{\mathbf{u}}_k)_j b_{ij}(\mathbf{x}_k; t), i = 1, \dots, n, t \in [0, t_s], \end{aligned}$$

где $a_i(\mathbf{x}_k; t)$, $b_{ij}(\mathbf{x}_k; t)$ — некоторые гладкие функции,

полученные из ряда $\sum_{i=1}^{k_2} \frac{t^p}{p!} x^p x_i |_{x_i = \hat{z}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t)}$ и $\chi^p x_i = \chi(\chi^{p-1} x_i)$. Для момента $t = t_s$ имеем

$$\begin{aligned} \hat{x}_i(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s) &= a_i(\mathbf{x}_k; t_s) + \\ &+ \sum_{j=1}^m (\bar{\mathbf{u}}_k)_j b_{ij}(\mathbf{x}_k; t_s), i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (9)$$

3 шаг. Выбор траектории прицеливания.

Для нахождения текущего управления требуется определить цель управления в виде желаемого состояния системы на следующем шаге управляемого движения. Для этого необходим выбор $\mathbf{x}_0(t_{k+s})$. Один из вариантов выбора — использовать обычную процедуру постоянного "прицеливания" в точку равновесия (точку стабилизации), приняв $\mathbf{x}_0(t_{k+s}) = \mathbf{0}$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$. Можно использовать иной подход: промежуточные точки некоторой опорной траектории.

4 шаг. Определение синтезируемого управления на интервале прогноза движения системы.

Выражение (9) используем для решения задачи стабилизации.

Замечание. В отличие от классического МПУ, где прогнозируемое управление рассчитывается на каждом шаге $h = \Delta t$ интервала прогноза $[0, t_s]$, в предлагаемом алгоритме на всем прогнозируемом интервале движения системы управление считается постоянным. Но сразу заметим, что, как и в обычном МПУ, полученное постоянное управление прикладывается только на одном, первом шаге данного интервала.

После выбора траектории стабилизации $\mathbf{x}_0(t)$ желаемое состояние системы (5) в момент t_{k+s} будет $\mathbf{x}_0(t_{k+s})$. Найдем такое (постоянное на интервале прогноза движения системы) управление $\bar{\mathbf{u}}_k$, при котором разность между векторами $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s)$ и $\mathbf{x}_0(t_{k+s})$ была бы минимальной по методу наименьших квадратов (переопределенная система). Более того, переход из состояния \mathbf{x}_k в состояние $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s)$ будем осуществлять с взвешиванием ошибки $\mathbf{e}(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s) = \mathbf{x}_0(t_{k+s}) - \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s)$ (вес \mathbf{Q}). Имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s) &= \mathbf{x}_0(t_{k+s}) - \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_k, \bar{\mathbf{u}}_k, t_s) = \\ &= \mathbf{x}_0(t_{k+s}) - \mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s) - \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s) \bar{\mathbf{u}}_k = \\ &= \tilde{\mathbf{a}}(\mathbf{x}_k; t_s) - \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s) \bar{\mathbf{u}}_k, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s) = (\mathbf{b}_1(\mathbf{x}_k; t_s) \dots \mathbf{b}_m(\mathbf{x}_k; t_s))$.

Для удобства опустим в выражении (10) аргумент и введем целевую функцию для минимизации ошибки слежения на каждом k -м шаге. Имеем

$$J_k = (\tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{B} \bar{\mathbf{u}}_k)^T \mathbf{Q} (\tilde{\mathbf{a}} - \mathbf{B} \bar{\mathbf{u}}_k) \rightarrow \min_{\bar{\mathbf{u}}_k}$$

Тогда управление на k -м шаге определится как

$$\bar{\mathbf{u}}_k = (\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{a}}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (11)$$

где N — общее число шагов дискретизации.

Комментарий. Несмотря на определенную простоту получения управления, принципиальным здесь остается выбор матрицы \mathbf{Q} и, особенно, описание уравнений ошибки, где используется аппроксимация действия однопараметрической группы. В качестве матрицы \mathbf{Q} предлагается использовать двухвалентный ковариантный тензор (обратную матрицу грамиана управляемости) для синтеза МПУ-управления, т. е. $\mathbf{Q} = \mathbf{W}_c^{-1}(t_w)$.

Аппроксимация локального грамиана управляемости для нелинейной системы управления (5) имеет вид [8]

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{W}}_c(t_w, \mathbf{x}) &= \int_0^{t_w} \left(\sum_{i=0}^{k_0} \frac{t^i}{i!} L_X^i Y_1(\mathbf{x}) \dots \right. \\ &\dots \left. \sum_{i=0}^{k_0} \frac{t^i}{i!} L_X^i Y_m(\mathbf{x}) \right) \left(\sum_{i=0}^{k_0} \frac{t^i}{i!} L_X^i Y_1(\mathbf{x}) \dots \right. \\ &\dots \left. \sum_{i=0}^{k_0} \frac{t^i}{i!} L_X^i Y_m(\mathbf{x}) \right)^T dt, \end{aligned} \quad (12)$$

где k_0 — число удерживаемых членов ряда, $t_w = N_w h$ — интервал прогноза для локального грамиана управляемости (определяет текущий размер локальной области управляемости), $t_w \gg t_u = t_s$. Выражение (12) будем использовать в качестве метрического тензора касательного пространства.

Условия сходимости синтезированного алгоритма управления

Стратегия управления должна обеспечить выполнение конечной цели — стабилизации системы. К числу выбираемых, варьируемых параметров в данном методе управления относятся:

- длина интервала прогноза движения системы $t_s = N_s h$;
- длина интервала прогнозируемого постоянства управления $t_u = N_u h$;
- совершенно новый параметр, который отсутствует в обычном МПУ, но влияет на управляемость, — длина интервала вычисления локального грамиана управляемости $t_w = N_w h$.

Кроме того, важным параметром, точнее элементом выбора, оказывающим, подчас, существенное влияние на качество стабилизации и амплитуду управления, является опорная или эталонная траектория стабилизации. Данные параметры должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить достаточные условия стабилизации, которые представлены ниже.

Полученное управление (11) подставляется в систему (9) и оценивается переход по модели из точки \mathbf{x}_k в точку

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+s} &= \mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s) + \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s) \bar{\mathbf{u}}_k = \mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s) + \\ &+ \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s) (\mathbf{B}^T(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{Q}(\mathbf{x}_k, t_w) \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s))^{-1} \times \\ &\times \mathbf{B}^T(\mathbf{x}_k; t_s) (\mathbf{Q}(\mathbf{x}_k, t_w) (\mathbf{x}_0(t_k + t_s) - \mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s))), \\ &k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (13)$$

Предположим, что выбран самый простой путь стабилизации — стабилизация в начало координат, т. е. опорная траектория $\mathbf{x}_0(t_k) = \mathbf{0}$, $k = 1, \dots, N$. Подставляя ее текущую точку в соотношение (13) и опуская для упрощения аргументы, получим

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+s} = \mathbf{a} - \mathbf{B}(\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{a}|_k = \mathbf{P} \mathbf{a}|_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (14)$$

где

$$\mathbf{P} = \mathbf{I}_n - \mathbf{B}(\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q}|_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

— оператор проектирования рассогласования между вектором $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s)$ и желаемым состоянием $\mathbf{x}_0(t_k + t_s) = \mathbf{0}$; \mathbf{I}_n — единичная матрица размерности n . Таким образом, для того чтобы $\mathbf{x}_{k+s} \rightarrow \mathbf{0}$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, достаточно, чтобы отображение $\mathbf{P} \mathbf{a}|_k$ было сжимающим, т. е.

$$\|\mathbf{P} \mathbf{a}|_k\| < \|\mathbf{x}_k\|. \quad (15)$$

Чтобы найти явное выражение для выполнения этого условия, представим вектор-функцию $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s)$ (если считать состояние \mathbf{x}_k текущим) в квазилинейном виде (см. лемму о представлении гладких функций в [10], стр. 155):

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s) = \mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{x}_k, \quad (16)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s)$ определяется из следующего интеграла:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s) = \int_0^1 \mathbf{J}(\theta \mathbf{x}_k; t_s) d\theta;$$

$\mathbf{J}(\mathbf{x}_k; t_s) = \left\| \frac{\partial \mathbf{a}(\mathbf{x}; t_s)}{\partial \mathbf{x}} \right\|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k}$ — матрица Якоби вектор-функции $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k; t_s)$.

С учетом квазилинейного представления (16) соотношение (14) примет вид

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+s} = \mathbf{P}(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{x}_k = \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{x}_k. \quad (17)$$

Так как интервал прогноза движения системы $[0, t_s]$ может быть относительно длинным, переход (17) рассмотрим на одном элементарном шаге $\Delta t = h$, но с применением управления, определенного на всем прогнозируемом интервале $[0, t_s]$, $t_s = t_u$. В этом случае имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= (\mathbf{A}(\mathbf{x}_k; h) - \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; h) (\mathbf{B}^T(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{Q}(\mathbf{x}_k, t_w) \times \\ &\times \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s))^{-1} \mathbf{B}^T(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{Q}(\mathbf{x}_k, t_w) \mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{x}_k = \\ &= \mathbf{G}(\mathbf{x}_k, t_s, h, t_w) \mathbf{x}_k = \mathbf{G}(k) \mathbf{x}_k, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}_k; h) = \mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s)|_{t_s=h}$,

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\mathbf{x}_k, t_s, h, t_w) &= (\mathbf{A}(\mathbf{x}_k; h) - \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; h) (\mathbf{B}^T(\mathbf{x}_k; t_s) \times \\ &\times \mathbf{Q}(\mathbf{x}_k, t_w) \mathbf{B}(\mathbf{x}_k; t_s))^{-1} \mathbf{B}^T(\mathbf{x}_k; t_s) \mathbf{Q}(\mathbf{x}_k, t_w) \mathbf{A}(\mathbf{x}_k; t_s)). \end{aligned}$$

Из выражения (18) следует следующая теорема (очень консервативный вариант, но достаточный для управления перевернутым маятником).

Теорема 2. Для того чтобы $\hat{\mathbf{x}}_{k+1} \rightarrow \mathbf{0}$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, достаточно, чтобы спектральный радиус обшей матрицы преобразования

$$\rho(\mathbf{G}_k) = \rho(\mathbf{G}(k) \mathbf{G}(k-1) \dots \mathbf{G}(1)) < 1, \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (19)$$

был меньше 1.

Пример. Управление перевернутым маятником на колесной паре

Обозначения и сокращения

ПМКП — перевернутый маятник на колесной паре;

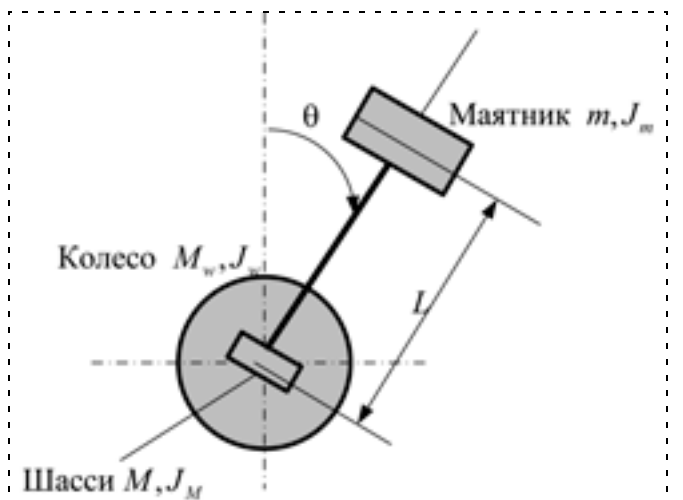


Рис. 1. Элементы ПМКП и некоторые его геометрические и физические характеристики

ШМ — шасси-маятник (динамически уравниваемая часть ПМКП) (рис. 1).

Индексы: R — правое колесо, L — левое колесо; τ_L, τ_R — моменты, создаваемые двигателями на колесах, $\text{H} \cdot \text{м}$;

θ_L, θ_R — углы поворота колес, рад;

H_L, H_R — силы трения между колесами и поверхностью, H ;

F_L, F_R — силы реакции между колесами и шасси-маятником (ШМ), H ;

f_{dL}, f_{dR} — внешние возмущающие силы, действующие на колеса, H ;

f_p — внешняя возмущающая сила, действующая на центр тяжести ШМ, H ;

θ — угол отклонения ШМ от вертикали (угол наклона), рад;

Ψ — угол курса (рыскания) ПМКП, рад;

g — ускорение свободного падения, м/с^2 ;

R_w — радиус колеса, м ; M_w — масса колеса, кг ;

m — масса маятника, кг ; M — масса шасси, кг ; J_w — момент инерции колеса относительно оси $0Z_b$ (ось угла наклона маятника, ось вращения колес), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

J_m — момент инерции маятника относительно оси $0Z_b$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

J_M — момент инерции шасси относительно оси $0Z_b$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

J_Ψ — момент инерции ПМКП относительно оси $0Y_1$ (ось угла курса), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; L — расстояние от оси вращения ПМКП до центра тяжести (ЦТ) маятника, м ;

D — расстояние между колесами, м .

Системы координат

➤ Инерциальная (неподвижная) система координат (ИСК) $0XYZ$, в которой плоскость $0XZ$ совпадает с плоскостью качения ПМКП (рис. 2).

➤ Система координат $0X_1Y_1Z_1$ (подвижная): начало координат 0_1 в середине отрезка, соединяющего центры колес; ось 0_1Y_1 направлена вертикально вверх; 0_1Z_1 — ось,

проходящая через центры колесной пары и направленная в сторону правого колеса; ось 0_1X_1 дополняет пару $0_1Y_1, 0_1Z_1$ до правой тройки.

➤ Связанная (подвижная) система координат (ССК) $0_bX_bY_bZ_b$ — система координат, полученная из системы координат $0X_1Y_1Z_1$ поворотом вокруг оси $0_1Z_1 = 0_bZ_b$ на угол наклона θ . Ось 0_bY_b ССК жестко связана с положением ШМ и проходит через его центр тяжести.

Математическая модель ПМКП

Предполагается, что отсутствует проскальзывание между колесами и поверхностью качения (три неголономные связи). Уравнения динамики получены исходя из схемы действия сил и моментов (рис. 2). При выводе уравнений мы опирались на результаты работ [1–3].

Имеем динамические уравнения (уравнения баланса сил и моментов) для колес (L — левое и R — правое, соответственно):

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_L J_w &= \tau_L - H_L R_w; \\ \ddot{x}_L M_w &= f_{dL} - F_L + H_L; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

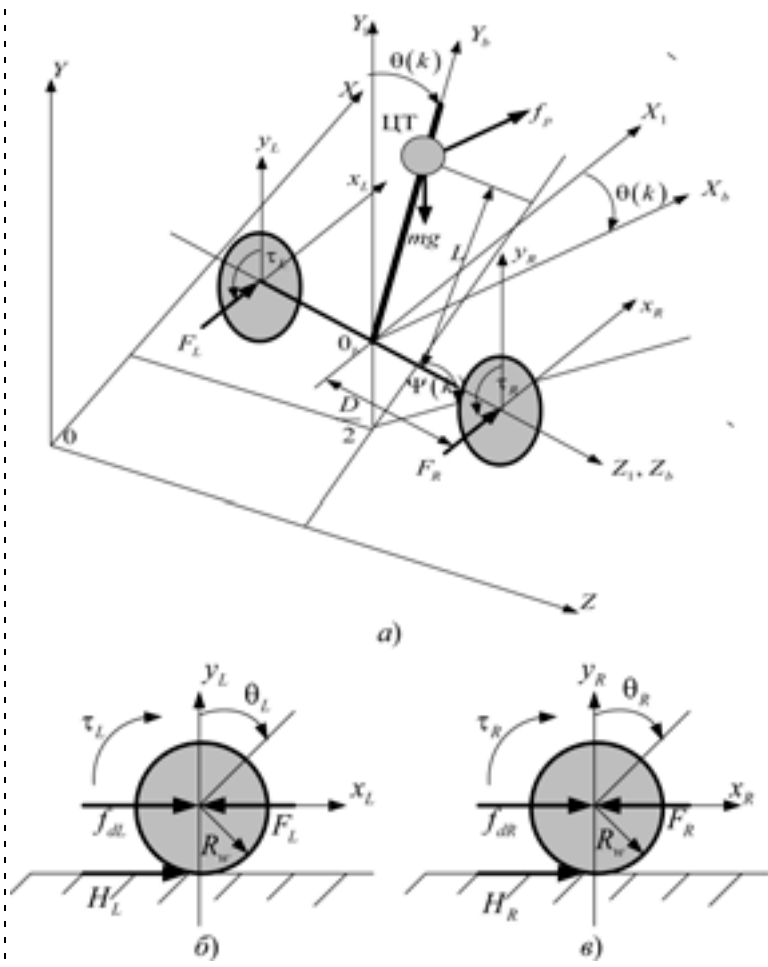


Рис. 2. Схемы действия сил и моментов: а — ПМКП; б — левого колеса; в — правого колеса

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\theta}_R J_w &= \tau_R - H_R R_w; \\ \ddot{x}_R M_w &= f_{dR} - F_R + H_R. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Отсутствие проскальзывания колес позволяет записать следующие соотношения:

$$\ddot{\theta}_L = \frac{\ddot{x}_L}{R_w}, \quad \ddot{\theta}_R = \frac{\ddot{x}_R}{R_w}. \quad (22)$$

Исключая из выражений (20)–(22) силы трения, получаем силы реакций:

$$\left. \begin{aligned} F_L &= - \left(M_w + \frac{J_w}{R_w^2} \right) \ddot{x}_L + f_{dL} + \frac{\tau_L}{R_w}; \\ F_R &= - \left(M_w + \frac{J_w}{R_w^2} \right) \ddot{x}_R + f_{dR} + \frac{\tau_R}{R_w}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Ускорение центра ПМКП определим через ускорения колес:

$$\ddot{x} = \frac{\ddot{x}_L + \ddot{x}_R}{2}. \quad (24)$$

Составим уравнение баланса моментов для ШМ относительно угла наклона (рис. 2):

$$(J_m + J_M) \ddot{\theta} = mgL \sin \theta - m \ddot{x} L \cos \theta + f_p L \cos \theta \quad (25)$$

и баланса горизонтальных сил для маятника

$$\begin{aligned} f_p - m \frac{d^2}{dt^2} (L \sin \theta) &= f_p - m L \cos \theta \ddot{\theta} + \\ &+ m L \sin \theta \dot{\theta}^2 = F_p, \end{aligned} \quad (26)$$

где F_p — горизонтальная сила, действующая в месте сочленения маятника и шасси. В силу малости угла θ отклонения ШМ от вертикали (угла наклона) и его скорости $\dot{\theta}$ пренебрежем в левой части выражения (26) последним слагаемым. Получим:

$$f_p - m L \cos \theta \ddot{\theta} = F_p. \quad (27)$$

Тогда уравнение баланса горизонтальных сил для всего ПМКП примет вид:

$$F_L + F_R + F_p = (m + M + 2M_w) \ddot{x}. \quad (28)$$

Из уравнений (23)–(27) получим дифференциальные уравнения для прямолинейного движения центра ПМКП и вращения ШМ:

$$\ddot{x} = \frac{a_1 \sin 2\theta + b_1 (\tau_L + \tau_R) + c_1 (f_{dL} + f_{dR})}{a_3 \cos^2 \theta - a_4} +$$

$$+ \frac{(c_2 \cos^2 \theta + c_1) f_p}{a_3 \cos^2 \theta - a_4}; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= \frac{a_2 \sin \theta + b_2 \cos \theta (\tau_L + \tau_R)}{a_3 \cos^2 \theta - a_4} + \\ &+ \frac{(c_3 (f_{dL} + f_{dR}) + c_4 f_p) \cos \theta L}{a_3 \cos^2 \theta - a_4}, \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$a_1 = m^2 L^2 R_w^2 g / 2; \quad a_2 = -Lg(2J_w m + R_w^2 M m + 4M_w R_w^2 m + R_w^2 m^2);$$

$$b_1 = -R_w (J_m + J_M); \quad b_2 = L m R_w; \quad c_1 = b_1 R_w;$$

$$c_2 = m L^2 R_w^2; \quad c_3 = m R_w^2;$$

$$c_4 = -(R_w^2 M + 2J_w + 4M_w R_w^2); \quad a_3 = m^2 L^2 R_w^2;$$

$$a_4 = R_w^2 (J_m + J_M) \left(M + m + 4M_w + 2 \frac{J_w}{R_w^2} \right).$$

Уравнение баланса моментов относительно угла курса Ψ :

$$J_\Psi \ddot{\Psi} = (F_L - F_R) \frac{D}{2}. \quad (31)$$

Вместе с тем, так как поворот ПМКП осуществляется за счет разности скоростей колес, имеем следующее кинематическое соотношение:

$$\ddot{\Psi} = \frac{\ddot{x}_L - \ddot{x}_R}{D}. \quad (32)$$

Из выражений (22), (23), (31), (32) получим дифференциальное уравнение для угла курса:

$$\ddot{\Psi} = b_3 (\tau_L - \tau_R) + c_5 (f_{dL} - f_{dR}), \quad (33)$$

где

$$b_3 = \frac{D R_w}{(2J_\Psi + D^2 M_w) R_w^2 + D^2 J_w}; \quad c_5 = R_w b_3.$$

Введем переменные состояния: $x_1 = x$; $x_2 = \dot{x} = V$; $x_3 = \theta$; $x_4 = \dot{\theta}$; $x_5 = \Psi$; $x_6 = \dot{\Psi}$ и вектор управления $\mathbf{u} = (u_1 \ u_2)^T = (\tau_L \ \tau_R)^T$, получим нелинейную аффинную систему управления ПМКП:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{X}(\mathbf{x}) + u_1 \mathbf{Y}_1(\mathbf{x}) + u_2 \mathbf{Y}_2(\mathbf{x}) + \mathbf{Z}(\mathbf{x}), \quad (34)$$

где соответствующие вектор-функции имеют вид:

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}) = (x_2 \ \frac{a_1 \sin(2x_3)}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} \ x_4 \ \frac{a_2 \sin x_3}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} \ x_6 \ 0)^T;$$

$$Y_1(x) = \left(0 \frac{b_1}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} 0 \frac{b_2 \cos x_3}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} 0 b_3 \right)^T;$$

$$Y_2(x) = \left(0 \frac{b_1}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} 0 \frac{b_2 \cos x_3}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} 0 -b_3 \right)^T;$$

$$Z(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{c_1(f_{dL} + f_{dR}) + (c_2 \cos^2 x_3 + c_1)f_p}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} \\ 0 \\ \frac{L(c_3(f_{dL} + f_{dR}) + c_4 f_p) \cos x_3}{a_3 \cos^2 x_3 - a_4} \\ 0 \\ c_5(f_{dL} - f_{dR}) \end{pmatrix}.$$

Цель управления и формирование опорной траектории для курсового угла

Цель управления: обеспечить движение ПМКП по окружности заданного радиуса R , отслеживая при этом с необходимой точностью заданные линейную скорость V^* центра ПМКП и угловую скорость движения Ω_α^* ПМКП по окружности и компенсировать возмущение f_p , приложенное в центре тяжести ШМ.

Формирование опорной траектории. При использовании метода МПУ для формирования точки прицеливания из текущего состояния x_k , $k = 1, 2, \dots, N - 1$, необходимы некоторые дополнительные геометрические построения, связанные с целью управления. В частности, требуется определять курсовой угол прогноза (прицеливания) $\Psi_p(k)$, что позволит нам учесть желаемую угловую скорость ПМКП Ω_α^* (центр окружности помещен в начало координат ИСК). Основные геометрические построения для нахождения данного угла приведены на рис. 3.

Пусть текущее положение точки 0_b ПМКП в ИСК в проекции на плоскость ZOX определяется координатами $Z(k)$, $X(k)$ — координатами вектора $a(k)$, угол курса (рыскания) — угол между осью OX ИСК и проекцией оси OX_b ССК на плоскость ZOX — равен $\Psi(k)$. Заданы: желаемая угловая скорость движения ПМКП по окружности радиуса R — Ω_α^* , интервал прогноза $t_\psi = n_\psi h$ для корректировки угла курса. По известным координатам $Z(k)$, $X(k)$ находим угловое положение точки 0_b ПМКП в ИСК (рис. 3): $\beta(k) = \arctg\left(\frac{X(k)}{Z(k)}\right)$. Опре-

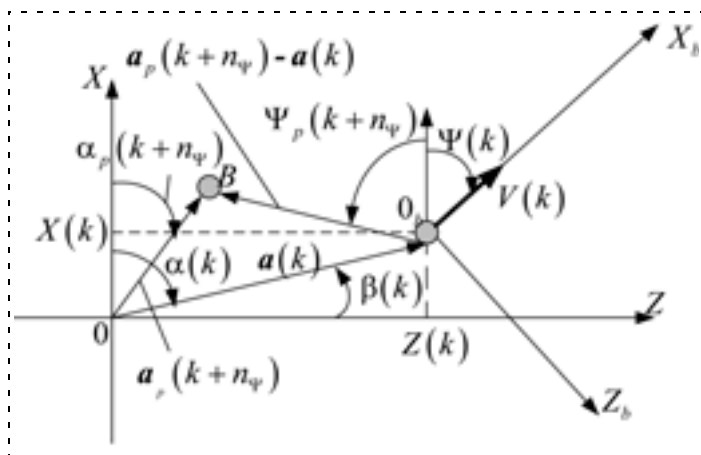


Рис. 3. Определение курсового угла прогноза

деляем желаемое угловое положение центра ПМКП на окружности

$$\alpha_p(k + n_\psi) = \frac{\pi}{2} - \beta(k) + \Omega_\alpha^* t_\psi.$$

Находим координаты желаемого положения центра ПМКП на окружности радиуса R в ИСК (точка B) через временной интервал t_ψ — координаты вектора $a_p(k + n_\psi) = (R \sin(\alpha_p(k + n_\psi)), R \cos(\alpha_p(k + n_\psi)))^T$. Определяем желаемый угол курса через временной интервал t_ψ :

$$\Psi_p(k + n_\psi) = \arccos\left(\frac{a_p(k + n_\psi) - a(k), e_X}{\|a_p(k + n_\psi) - a(k)\|}\right),$$

где $e_X = (0 \ 1)^T$ проекция орта $(0 \ 1 \ 0)^T$ ИСК $OZXY$ на плоскость ZOX .

Моделирование

Числовые значения параметров модели ПМКП были взяты из [4]: $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $R_w = 0,2 \text{ м}$; $M_w = 5 \text{ кг}$; $m = 25 \text{ кг}$; $M = 15 \text{ кг}$; $J_w = 0,16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_m = 1,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_M = 0,33 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_\Psi = 0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $L = 0,75 \text{ м}$; $D = 0,4 \text{ м}$.

Выбранные опорные траектории: а) линейная скорость центра ПМКП $V_0(t) = V^*(1 - e^{-\alpha_V t})$, $\alpha_V = 1,3$; б) угол наклона ШМ $\theta_0 = 0$; в) угловая скорость угла наклона $\dot{\theta}_0 = 0$; г) угол курса $\Psi_0 = \Psi_p$; д) угловая скорость курсового угла $\dot{\Psi}_0 = \Omega_\alpha^*(1 - e^{-\alpha_\Psi t})$, $\alpha_\Psi = 2,7$. Опорная траектория для линейного перемещения ПМКП определялась простым интегрированием линейной скорости на некоторый интервал вперед от текущего положения, так как считаем эту координату свободной.

Траекторные параметры: радиус окружности $R = 1 \text{ м}$ с центром в точке 0 ИСК; начальные условия для модели ПМКП $x(0) = 0$; начальное положение

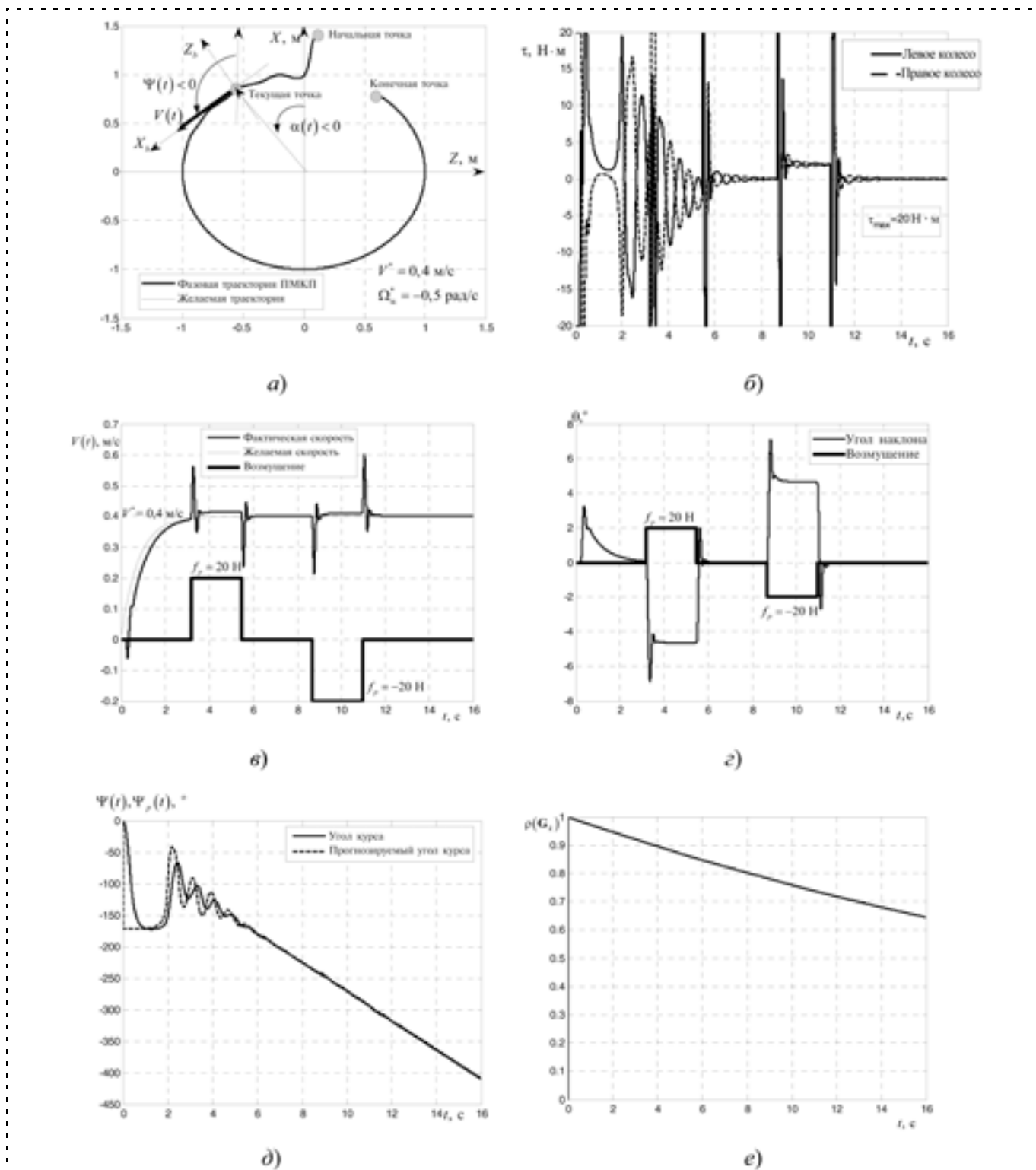


Рис. 4. Результаты моделирования ПМКП при движении по окружности:

a — фазовая траектория на плоскости $X0Z$; *b* — управляющие моменты; *в* — линейная скорость центра ПМКП; *г* — угол наклона ШМ; *д* — угол курса (фактический и прогнозируемый); *е* — спектральный радиус матрицы $\rho(\mathbf{G}_k)$

центра ПМКП на плоскости $X0Z$ $Z_{\text{ПМКП}}(0) = 0,1$ м; $X_{\text{ПМКП}}(0) = 1,4$ м; желаемая угловая скорость ПМКП по окружности $\Omega_{\alpha}^* = -0,5$ рад/с, желаемая линейная скорость центра ПМКП $V^* = 0,4$ м/с. При моделировании использовались следующие парамет-

ры метода МПУ с грамиановзвешиванием: $N_w = 300$, $N_u = 40$, $h = 0,001$ с, $k_1 = k_2 = 3$, $k_0 = 5$. Грамиан управляемости $\mathbf{Q} = \mathbf{W}^{-1}(t_w, \mathbf{x}_k)$ был определен только в точке равновесия $\mathbf{x}_e = \mathbf{0}$ и не пересчитывался. Максимальный момент на каждое колесо $\tau_{\text{max}} = 20$ Н·м.

Моделирование проводилось на интервале $[0, 16]$ с. При этом с момента $t = 3,1$ с в течение 2,2 с на ШМ действует возмущение $f_p = 20$ Н, а с момента $t = 8,5$ с в течение 2,5 с на ШМ действует возмущение $f_p = -20$ Н.

Результаты моделирования представлены на рис. 4, которые говорят о том, что предложенный алгоритм управления обладает робастными свойствами по отношению к возмущению и в полной мере решает поставленную задачу слежения.

Заключение

В данной статье рассмотрен алгоритм управления перевернутым маятником на колесной паре на основе метода модельного прогнозируемого управления с грамиановзвешиванием и декомпозиции нелинейных дифференциальных уравнений объекта управления. Представлены методика синтеза, условия сходимости алгоритма и результаты моделирования при движении перевернутого маятника по кругу. Показаны робастные свойства предложенного регулятора к возмущениям.

Список литературы

1. Ren T. J., Chen T. C., Chen C. J. Motion control for a two-wheeled vehicle using a self-turning PID controller // Control Engineering Practice. 2008. V. 16. N 2. P. 365—375.

2. Grasser F., D'Arrigo A., Colombi S., Ruffer A. C. JOE: a mobile, inverted pendulum // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. V. 49. N 1. P. 107—114.

3. Белотелов В. Н., Мартыненко Ю. Г. Управление пространственным движением несимметричной двухколесной роботизированной платформы // Мобильные роботы и мехатронные системы: Матер. науч. школы-конференции, Москва, 24—29 марта 2008. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 70—85.

4. Pathak K., Franch J., Agrawal S. K. Velocity Control of Wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization // Proceedings of 43rd IEEE Conference on Decision and Control, December 14—17, 2004, Atlantis, Paradise Island, Bahamas. P. 3962—3967.

5. Chen K. T. Decomposition of Differential Equations // Math. Annalen. 1962. N 146. P. 263—278.

6. Krener A. J. A decomposition theory for differentiable systems // SIAM J. Contr. & Opt. 1977. V. 15. N 5. P. 813—829.

7. Краснощеченко В. И. Декомпозиция дифференциальных уравнений. Присоединенное представление действия группы Ли в нелинейных системах // Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. "Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе", 17—18 декабря, Калуга, 2009. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. С. 146—151.

8. Краснощеченко В. И. Геометрические методы анализа и синтеза нестационарных систем. В кн. Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Издательство МГТУ, 2007. 632 с. (С. 339—398).

9. Краснощеченко В. И. Синтез управления в задаче быстрого действия с использованием метода модельного прогнозируемого управления / Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 10. С. 2—10.

10. Введение в топологию: Учеб. пособие для вузов / Борисович Ю. Г., Белизьяков Н. М., Израилевич Л. А. и др. М.: Высш. шк., 1980. 296 с.

12—14 октября 2010 г. в Санкт-Петербурге
в рамках 3-й мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2010) состоится



7-я научно-техническая конференция "МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ" (МАУ-2010)

Научные направления конференции:

- ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В МЕХАТРОННЫХ И ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
Руководители: член-корр. РАН Е. Д. Теряев, д. т. н., проф. Н. Б. Филимонов
- ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
Руководители: член-корр. РАН Г. Г. Себряков, к. п. н., проф. С. Ф. Сергеев
- ПРОБЛЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ МЕХАТРОННЫХ, ЭРГАТИЧЕСКИХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Руководители: д. т. н., проф. Е. И. Юревич, д. т. н., проф. А. С. Ющенко
- ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
Руководители: член-корр. РАН А. Ф. Резчиков, д. т. н., проф. Ю. В. Подураев

Конференция МАУ-2010 проводится в ОАО "Концерн ЦНИИ "Электроприбор"

Подробная информация о конференции "МАУ-2010" размещается на сайте журнала
"Мехатроника, автоматизация, управление":

<http://novtex.ru/mech/mau2010.htm>

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.8:004.323

Е. Д. Теряев, чл.-корр. РАН, науч. рук. лаб.,

К. В. Петрин, зав. лаб.,

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, главн. науч. сотр.,

Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр.,

ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва

mech@novtex.ru

Агентные технологии в автоматизированных информационно-управляющих системах.*

Часть 1. Основы агентного подхода

Излагаются базисные положения агентного подхода. Приводится типизация и обсуждаются свойства программных агентов. Рассматривается структура мультиагентных систем, механизмы взаимодействия и формы социальной организации агентов. Отмечаются отличительные свойства агентно-ориентированного программирования.

Ключевые слова: автоматизация информационно-управляющих функций, мультиагентные системы, коллективное поведение агентов, механизмы переговоров, архитектура программного агента, онтология

В настоящее время исследования по интеллектуальным агентам оформились в самостоятельный обширный и многоплановый раздел интеллектуальных информационных технологий. Мультиагентные системы интегрируют в себе самые передовые достижения в области программного обеспечения, систем искусственного интеллекта и распределенных информационных систем, демонстрируя принципиально новые качества самоорганизации и интеллектуального поведения.

Агентная парадигма завоевывает все большую популярность в современном информационном мире. Так, агентный подход бурно разрабатывается применительно к сферам компьютеризации социальных и экономических систем, информационно-телекоммуникационных услуг, электронной коммерции и электронного образования. Значительно меньший размах данных исследований связан с техническими приложениями агентного подхода. Однако такое положение вещей вряд ли можно признать удовлетворительным, поскольку агент-

ные решения могут иметь существенные конкурентные преимущества также и в сфере автоматизации технических и производственно-технических систем.

Одна из закономерностей научно-технического прогресса — ускоренное возрастание сложности и масштабности технических систем и степени их воздействия на техносферу. В особенности это относится к производственной среде — она насыщается все более мощными техническими системами и технологиями. В этих условиях первостепенное значение приобретает проблема эффективной и безопасной эксплуатации систем автоматизации, которая прямо связана с уровнем автоматизации и информатизации процессов контроля и управления.

Согласно принципу необходимого разнообразия У. Р. Эшби разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия управляемого объекта. В наибольшей мере разнообразие собственного поведения присуще интеллектуальным системам и, прежде всего, системам с мультиагентной организацией. Следовательно, перспективы реализации принципа Эшби для сложных технических систем правомерно связывать именно с агентными технологиями.

Цель настоящей статьи — дать анализ перспектив применения агентного подхода к решению задач автоматизации процессов контроля и управления в сложных технических системах.

В статье рассматривается класс *автоматизированных информационно-управляющих систем* (АИУС) — систем автоматизации процессов контроля и управления, обладающих следующими свойствами: система является человеко-машинной, работает в реальном масштабе времени и имеет развитые информационные функции. Класс АИУС охватывает автоматизированные системы управления техническими объектами и системы диспетчерского управления, используемые в сфере материального производства (промышленность, энергетика, транспорт, ЖКХ, инженерные коммуникации и т. п.). Сюда же можно отнести также системы автоматизированного мониторинга материальных (технических и природных) объектов.

Статья является расширенным вариантом пленарного доклада авторов "Мультиагентные технологии в информационно-управляющих системах: современное состояние, проблемы и перспективы применения", представленного на Международной научно-технической мультиконференции "Актуальные проблемы информационно-компьютерных техно-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-01139-а).

логий, мехатроники и робототехники ИКТМР-2009" (п. Дивноморское, 29 сентября 2009 г.).

Статья состоит из трех частей:

- Часть I. Основы агентного подхода.
- Часть II. Агентные решения в задачах контроля и управления.
- Часть III. Средства агентно-ориентированного программирования.

На сегодняшний день теория мультиагентных систем имеет обширную библиографию. Достаточно полное представление о ее становлении и современном уровне развития дают публикации, например, [2, 3, 5–9, 11, 12, 14–16, 18, 19, 28, 37, 38]. Весьма затруднительно дать сжатое и в то же время целостное представление о мультиагентных системах. В связи с этим в первой части настоящей статьи авторы ограничились изложением базисных положений агентного подхода, ни в коей мере не претендуя на полноту и детализацию в освещении затрагиваемых вопросов.

Вторая часть статьи посвящена принципам и методологии построения мультиагентных АИУС. В третьей части статьи обсуждается программный инструментарий разработки мультиагентных автоматизированных систем.

Программные агенты

Под *агентом* понимается любая сущность, которая может воспринимать среду обитания (внешний мир) и воздействовать на нее.

Искусственный агент может иметь программно-аппаратную реализацию (робот). *Виртуальные агенты* существуют только в программной среде. Их называют "программными роботами" (software robots) или сокращенно софтботами (softbot).

Рациональный агент действует таким образом, чтобы достичь наилучшего ожидаемого результата.

Минимальный набор базовых свойств агентов:

- ♦ *автономность* — агент является самоуправляемым, самостоятельно контролирует свое внутреннее состояние и свои действия;
- ♦ *реактивность* — способность реагировать на изменения во внешней среде за приемлемое время;
- ♦ *целенаправленность* — у агента имеется определенная цель и его поведение подчинено этой цели;
- ♦ *коммуникативность* — способность общаться с другими агентами, используя для этого некоторый язык.

Для агентов постулируются также и другие свойства:

- *непрерывность функционирования* — агент постоянно находится в активном состоянии (состоянии исполнения);
- *обучаемость* — способность корректировать свое поведение, основываясь на предыдущем опыте;

- *мобильность* — способность перемещаться во внешней среде.

Взаимодействие агентов с внешней средой осуществляется благодаря *рецепторам* (сенсорам) — механизмам восприятия состояния внешней среды и его отражения на внутреннее состояние агента, и *эффекторам* — механизмам воздействия на внешнюю среду.

Агент имеет ограниченные возможности по восприятию и воздействию на окружение, т. е. последнее не является для него полностью наблюдаемым и управляемым.

Далее мы ограничимся рассмотрением виртуальных (программных) агентов.

Программные агенты выполняются асинхронно в соответствии с предписанной целью. Они сами являются инициаторами действий по изменению своего поведения в окружающей среде: обладают возможностью "самозапуска", могут "заснуть" — прекратить активные действия до некоторого момента времени или какого-то события, после чего сами возобновляют действия, не требуя какого-то "включения" извне.

Агенты можно классифицировать по степени развития внутреннего представления внешнего мира и способу поведения.

Сложность внутреннего представления внешнего мира является показателем интеллектуальности и индивидуальности агентов. По этому признаку выделяют реактивные и интеллектуальные агенты [16].

Реактивные агенты имеют довольно бедную (или не имеют вовсе) внутреннюю модель внешней среды. Их поведение определяется механизмом "стимул—реакция". Они могут иметь лишь слабо выраженную индивидуальность, сильно зависят от внешней среды и практически не способны планировать свои действия.

Интеллектуальные агенты обладают более богатым представлением внешней среды, чем реактивные. Это обусловлено наличием у них *базы знаний, механизмов логического вывода и анализа действий*.

Интеллектуальный агент можно представить кортежем

$$a = \langle I, E, C, B \rangle ,$$

где I — рецепторы, E — эффекторы, C — механизм принятия решений, B — база знаний агента, включающая базу целей, концепций и фактов.

В классе интеллектуальных агентов выделяют когнитивные и разумные агенты. Когнитивные (cognitive) агенты имеют более ярко выраженную индивидуальность, будучи гораздо более автономными, чем реактивные, и характеризуются развитым целесообразным поведением в сообществе агентов. Разумные (deliberative) агенты обладают символической моделью внешнего мира, а также возможностью принимать решения на основе символических рассуждений. Благодаря этому они могут запоминать и анализировать различные ситуации,

предвидеть возможные реакции на свои действия и на основе этого планировать свое поведение. Именно данные интеллектуальные способности позволяют таким агентам строить *виртуальные миры*, работая в которых, они формируют планы действий.

По способу поведения интеллектуальные агенты делятся на *рефлекторные* и *интенциональные*.

Интенциональные агенты наделены собственными механизмами мотивации. Это означает, что в них так или иначе моделируются внутренние убеждения, желания, намерения и мотивы, порождающие цели, которые определяют их действия. Напротив, *рефлекторные* агенты не имеют внутренних источников мотивации и собственных целей, а их поведение характеризуется простейшими (одношаговыми) выводами или автоматизмами. Они способны отвечать на вопросы и выполнять задания, которые ставят перед ними другие агенты, но решение этих задач не приводит к появлению у них собственных целей. Типичными примерами таких агентов являются системы поиска в базах данных и простейшие логические регуляторы.

Мультиагентная система (МАС) — система, содержащая агентов, взаимодействующих между собой.

Агентный подход основан на декомпозиции решаемых задач на подзадачи и распределении подзадач между агентами. Для успешного взаимодействия агенты должны уметь сотрудничать, координировать действия и вести переговоры. Основная идея агентного подхода — делегирование задач агентам. Весьма полезное свойство агентов — возможность их выполнения в фоновом режиме.

Чаще всего реактивные агенты используются в роли агентов-исполнителей для решения узкоспециализированных задач, которые ставят перед ними интеллектуальные агенты.

Метафоризмы агентного подхода

Агентный подход является естественной и удобной абстракцией, основанной на придании антропоморфных свойств программным компонентам, что позволяет переносить на программные системы организационно-управленческий опыт человека. Имитация на программном уровне интеллектуальных аспектов взаимодействия людей может быть весьма эффективной функциональной моделью МАС.

Агенты как программные компоненты с интеллектуальным поведением наделяются *антропоморфными* свойствами, а МАС — *социоморфными* свойствами. Это дает не только удобные абстракции для описания и анализа поведения систем, но и подсказывает принципиально новые подходы для их синтеза.

В области МАС наряду с антропоморфной также востребованной оказывается фитоморфная и зооморфная метафоры.

Так, П. Браспеннинг [20] предлагает разделять агентов на три категории: реактивные, целеполагающие и целесоگласующие. Для придания большей метафоричности эти категории агентов уподобляют компонентам триады "*растение — животное — человек*" и называют соответственно биоморфными, зооморфными и социоморфными.

Реактивные (биоморфные) агенты подобны растениям. Целевые установки определены их архитектурой, а действия являются результатом выполнения стереотипных программ с посылкой сообщений другим агентам или в окружающую среду. Агенты этого класса используются в системах проектирования и оперативного планирования производства.

Целеполагающие (зооморфные) агенты подобны животным. Они способны рассуждать о своих намерениях, строить и выполнять планы действий, а также координировать свои действия путем обмена информацией об индивидуальных предпочтениях или задачах.

Целесогласующие (гуманоидные, социоморфные) агенты обладают знаниями о других агентах и согласуют с ними свои действия, способны к рефлексии, характеризуются социальным (ролевым) поведением.

Мультиагентные системы

МАС строится как сообщество агентов, которые могут общаться друг с другом (рис. 1) с помощью некоторого языка коммуникаций ACL (Agent Communication Language). Агрегированное поведение такой системы проявляется посредством локальных взаимодействий отдельных агентов.

МАС в типовом составе включает:

- среду, в которой существуют агенты;
- множество задач, решение которых поручается агентам;
- множество отношений, допустимых между агентами;
- множество структур, которые могут быть созданы в системе из агентов;
- множество действий, доступных агентам.

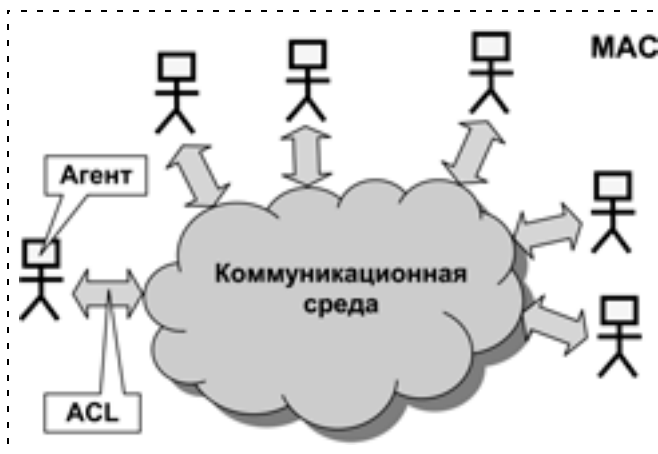


Рис. 1. Коммуникации в мультиагентной системе

Мультиагентную систему можно представить короткем:

$$M = \langle A, O, F, P \rangle,$$

где A — множество агентов; O — множество объектов внешней среды, с которыми взаимодействуют агенты; F — множество функций системы; P — отношения между агентами, определяющие архитектуру системы.

Под объектами понимаются материальные системы, пользователи, эксплуатационный персонал, информационные и вычислительные процессы, фрагменты данных.

Если МАС по отношению к ее окружению действует как единый агент, то естественно составляющих ее агентов называть субагентами.

Возможные типы взаимодействия агентов [см. также 14]:

- *горизонтальные связи* — связи между равноправными агентами;
- *вертикальные (субординационные) связи* — связи подчинения;
- *координация* — согласованное действие агентов, подчиняющихся вышестоящему агенту-координатору.

Агенты объединяются в группы для совместных действий, направленных на достижение общей цели. При этом возможны два подхода к решению общих задач. Первый — разделить задачу на подзадачи и распределить последние между агентами. Второй — позволить каждому из агентов решать исходную задачу своим способом и затем выбирать наилучшее решение либо применять процедуру голосования агентов за то или иное решение.

Необходимость в совместном решении задач возникает тогда, когда агент не может решить задачу в целом или, по крайней мере, не может решить ее так же хорошо, как при сотрудничестве агентов. Распределенное решение задач требует групповой согласованности действий агентов. При этом необходимо учитывать возможную противоречивость собственных целей агентов, а также различия в их компетентности, интеллектуальных, информационных и вычислительных ресурсах.

Синтез итогового результата проводится тем агентом, который инициировал распределение задачи. Он собирает частные результаты агентов-исполнителей и формирует общий результат.

Архитектура определяет метод взаимодействия агентов в процессе функционирования МАС. Различают одноуровневую и многоуровневую архитектуры. В одноуровневой архитектуре распределение задач и ресурсов происходит посредством голосования агентов. Многоуровневая архитектура поддерживает координацию действий агентов.

Организационная структура МАС определяется ролевыми функциями агентов и нормами их взаимодействия.

По ролевому признаку можно вычленить несколько видов агентов: агенты-исполнители и

агенты-менеджеры — первые подчиняются вторым; агенты-координаторы, ответственные за организацию взаимодействия агентов; интерфейсные агенты, служащие для связи с внешней средой; канальные агенты, обеспечивающие обмен информацией в системе. Эти роли соответствуют минимальному набору функций, необходимых для достижения главной цели МАС.

Современная теория и практика МАС предполагает три типа структурной организации коллективного поведения агентов [16]:

- ◆ *распределенный искусственный интеллект (РИИ)*;
- ◆ *децентрализованный искусственный интеллект (ДИИ)*;
- ◆ *искусственная жизнь (ИЖ)*.

Структура РИИ создается для решения конкретной интеллектуальной задачи и предполагает централизованное управление — координацию действий всех агентов. При этом необходимо решать ряд организационных вопросов:

- 1) декомпозиции исходной задачи на подзадачи;
- 2) формирования группы интеллектуальных агентов для решения подзадач;
- 3) назначения статуса и объема властных полномочий агентов;
- 4) организации коммуникаций для обмена данными и ресурсами в процессе решения задачи;
- 5) определения механизма согласования целей отдельных агентов, координации их действий и разрешения конфликтных ситуаций.

Структура ДИИ ориентирована на динамическую агентную среду и решение некоторого набора интеллектуальных задач. В ней управление агентами осуществляется децентрализованно — только на уровне их локального взаимодействия. Здесь наряду с распределенными компетенциями и ресурсами должны быть определены и локальные задачи отдельным агентам, решаемые на базе локальных моделей и критериев.

Структура ИЖ создается из большого числа простых реактивных агентов. Здесь глобальное интеллектуальное поведение всей системы рассматривается как эволюционный феномен результата локальных взаимодействий агентов друг с другом и со средой.

Основная парадигма ИЖ состоит из следующих посылок:

- "искусственная жизнь" — это популяция простых и взаимосвязанных единством цели агентов;
- каждый агент самостоятельно определяет свое поведение в среде обитания и способ взаимодействия с другими агентами;
- отсутствуют заранее установленные правила, определяющие глобальное поведение популяции агентов;

- процессы самоорганизации коллективов агентов определяются только локальными взаимодействиями агентов.

В ИЖ могут образоваться искусственные сообщества — их называют роями (наподобие сообщества пчел).

Искусственный рой представляет собой сеть агентов, согласованно действующих для приспособления к среде обитания. Процесс взаимодействия агентов не является алгоритмическим и формирует механизм самоорганизации, следствием чего является эмерджентный эффект — приобретение системой нового качества, не присутствующего ее элементам.

Под *роевым интеллектом* (Swarm Intelligence) [22, 39] понимают коллективный интеллект социальных насекомых. Это же понятие естественно применять к рою агентов, вовлеченных в процесс решения сложных или плохоформализованных задач.

Формы социальной организации агентов

Социальная организация по А. И. Пригожину — группа людей, совместно и координированно реализующая общую цель. Согласно воззрениям социальной биологии, социальная организация начинается там, где два индивида вступают в контакт. Социальное (общественное) поведение — поведение членов сообщества. Например, говорят о социальной организации муравьиной колонии, социальном поведении муравьев.

Между агентами возможны следующие виды отношений:

- сосуществование (агенты действуют изолированно);
- кооперация (взаимовыгодное сотрудничество равноправных агентов);
- конкуренция (сопоставительное поведение агентов);
- компромисс (готовность пойти на взаимные уступки);
- конформизм (отказ от собственных интересов);
- негативизм (отказ от общения и взаимодействия в любом вопросе).

Типовые организационные структуры с позиций социологии: группа, команда, иерархия, сеть [1, 4, 17].

Применительно к коллективам агентов естественно воспользоваться понятиями социологии и социальной биологии.

Группа — объединение агентов для достижения общей (групповой) цели деятельности. Каждый агент преследует собственные цели и, в то же время, подчиняется предписанным правилам поведения (содержащимся в онтологии). Данные правила направляют усилия агентов на общую цель и должны обеспечивать ее достижение.

Команда — группа агентов со структурированным поведением участников (членов команды), подчиняющихся своему лидеру.

Иерархия — многоуровневая форма организации агентов с подчиненностью агентов нижнего уровня определенному агенту верхнего уровня.

Сеть — организационный тип, который характеризуется структурой свободно связанной сети принципиально равноправных и независимых партнеров.

Механизмы переговоров

Конфликт между автономностью агентов и необходимостью их принуждения стремиться к общей цели разрешается путем переговоров. Существуют различные механизмы согласования интересов и позиций, технологии компромиссов. Перечислим некоторые из них.

Игровые модели. Данные модели могут быть использованы для формирования правил переговоров и соглашений между агентами в условиях кооперации, компромисса или конфликта. При этом наряду с классической теорией игр несомненный интерес представляет также *эволюционная теория игр* [27, 30, 33], которая имеет дело с популяциями игроков, наделенных свойством наследования стратегий. В процессе эволюции популяции частота стратегий в следующем поколении увеличивается пропорционально выигрышу игроков, придерживающихся ее в текущем поколении.

Модель аукционных торгов. Данная модель может применяться в качестве механизма распределения информационных и вычислительных ресурсов при организации потоков задач в сети агентов. В торгах участвуют агенты, являющиеся владельцами и потребителями ресурсов. Первые выставляют их на продажу, а вторые пытаются их купить. Здесь используется принцип состязательности: победителем торгов признается агент, предложивший наиболее высокую цену. Для расчетов применяются виртуальные деньги, которыми в некотором объеме снабжаются агенты-покупатели. Виртуальные деньги служат средством контроля и рационального использования ограниченных ресурсов.

Модель "классной доски" ("доски объявлений"). Данная модель положена в основу многих разработок по организации коммуникации между агентами. Решение многих задач требует координации ряда разнородных источников знаний. "Классная доска" (blackboard) — это центральная глобальная база данных, предназначенная для связи независимых асинхронных источников знаний, а ее архитектура — модель координации источников знаний, взаимодействующих через общее информационное поле [7].

Модель договорных (контрактных) сетей. Данная модель распределенного решения задач предложена Р. Смитом [35] и использует метафору пе-

реговоров между автономными интеллектуальными агентами и основана на идее *рыночных торгов*. Имеются три типа агентов: агент-менеджер, агент-исполнитель, агент-подрядчик. Агент-менеджер распространяет объявление о задании и определяет исходную цену, а агенты, являющиеся потенциальными исполнителями, предлагают свои услуги, посылая свои варианты цен, и участвуют в конкурсе на определение наилучших предложений по исходному заданию. Затем агент-менеджер отбирает самые выгодные для него предложения и заключает соглашения с выбранными агентами-исполнителями, которые становятся агентами-подрядчиками. Основное преимущество модели договорных сетей состоит в ее простоте и легкости реализации.

Архитектура агентов

Принято выделять три основных класса архитектур агентов [3, 31, 34, 37]:

- *делиберативные* (deliberative architecture), базирующиеся на принципах и методах работы со знаниями;
- *реактивные* (reactive architecture), основанные на поведенческих моделях типа "стимул—реакция";
- *гибридные* (hybrid architecture), соединяющие черты архитектур обоих типов.

Термин "делиберативная архитектура" введен в работе [25]. Агентам с "делиберативной архитектурой", именуемых также разумными, присущи следующие "*ментальные свойства*" [23, 37]:

- *знания* (knowledge) — постоянные, неизменяемые в процессе функционирования знания агента о себе, среде и других агентах;
- *убеждения* (beliefs) — знания агента о среде (в том числе о других агентах), которые могут с течением времени изменяться и даже становиться неверными;
- *желания* (desires) — состояния среды, в которые агент стремится ее перевести, причем они могут быть противоречивыми и не достижимыми;
- *цели* (goals) — множество совместимых и достижимых желаний;
- *намерения* (intentions) — множество избранных целей (поскольку агент ограничен в ресурсах и не может достичь всех целей одновременно), которые агент собирается достигнуть вследствие своих желаний или в силу взятых на себя обязательств;
- *обязательства* (commitments) — задачи, которые агент берет на себя по просьбе (поручению) других агентов в рамках кооперативных целей или целей отдельных агентов в рамках сотрудничества.

Считается, что разумный агент должен обладать *собственной символьной моделью внешнего мира* и принимать решения на основе формально-логических рассуждений. Таким образом, принимается *гипотеза Ньюэла—Саймона: физическая символьная*

система способна осуществлять базовые интеллектуальные действия [7].

Агенты строят свою виртуальную модель мира на основе информации, которую получают из внешней среды, и способны принимать решения на основе формальных рассуждений логического или псевдологического типов. Это достигается за счет наличия в архитектуре агента базы знаний и механизма принятия решений. Агенты могут запоминать и анализировать различные ситуации, предвидеть возможные результаты своих действий, делать из этого выводы и формировать планы дальнейших действий.

Сначала идея агента, основанного на знаниях, строилась на чисто логической основе и представлялась весьма перспективной. Однако позднее было обнаружено, что лежащее в основе такого подхода исчисление предикатов первого порядка не позволяет выразить такие ментальные свойства агента, как убеждения, желания, намерения, обязательства по отношению к другим агентам и т. д. В связи с этим были разработаны специальные варианты расширений модальных и подобных модальным логик, которые оказались с точки зрения реализуемости более удачными. Такие архитектуры были названы Belief-Desire-Intention-архитектурами.

Belief-Desire-Intention (BDI)-архитектура — частный тип делиберативных архитектур, базирующихся на расширениях модальных логик, позволяющий выражать *ментальные* свойства агента: желания, намерения, обязательства.

Заметим, что идея архитектуры разумного агента в настоящее время уже вышла за пределы логической парадигмы представления и обработки знаний. Имеются архитектуры, которые исповедуют лингвистический подход (на основе формальных грамматик), а также приближенные знания и правдоподобные рассуждения.

Принципы реактивной архитектуры возникли как альтернативный подход к делиберативной архитектуре. Идея реактивных агентов впервые возникла в 1986 г. в работе Брукса (R. A. Brooks). Он выдвинул тезис, что интеллектуальное поведение может быть реализовано без эксплицитно представленной модели мира [21, 24]. Реактивные агенты не имеют какой-либо символьной внутренней модели мира и действуют [29, 32] в режиме реального времени, основываясь на небольшом количестве информации от своих сенсоров и простых правилах "ситуация—действие".

Простой вариант реактивных агентов — тот, при котором их реакции на внешние события генерируются соответствующими конечными автоматами.

Гибридные архитектуры позволяют гибко комбинировать возможности делиберативной и реактивной архитектур и поэтому более приемлемы для практических разработок.

В [36] когнитивным агентам приписывается нервно-системная организация структуры, функций и поведения. Эти агенты решают задачи координации и выбора поведения с использованием когнитивных механизмов [13], способных обучаться и принимать решения ассоциативно.

InteRRaP-архитектура. В качестве примера рассмотрим архитектуру *InteRRaP* (*INTEgration of Reactive behavior and Rational Plannig*) [10, 31]. Она представлена на рис. 2, является вертикальной (трехуровневой) и гибридной, соединяя в себе свойства реактивных и BDI-архитектур. Здесь агент состоит из двух частей: тела и интеллекта.

Тело агента имеет сенсорно-коммуникативно-эффекторное назначение. *Интерфейс с внешним миром* обеспечивает агентам восприятие событий внешнего мира, воздействия на него и средства коммуникаций.

Интеллект агента включает, во-первых, *компонент управления*, реализующий три иерархических уровня управления: реактивный, локального и кооперативного планирования, и, во-вторых, *базу знаний* (БЗ), которая также имеет трехуровневую структуру и, соответственно, содержит три типа моделей: модель мира, ментальную и социальную модели.

Реактивный уровень обеспечивает реакцию агента на стандартные ситуации. *Уровень локально-*

го планирования позволяет строить локальные планы автономного поведения агента и активирует реактивное поведение через нижележащий уровень управления. *Уровень кооперативного планирования* осуществляет конструирование планов совместного поведения агентов для достижения некоторых общих целей.

БЗ агента построена по принципу доски объявлений. Уровни базы знаний фактически отвечают степени абстракции знаний в соответствии с уровнями управляющей компоненты.

Модель мира агента содержит убеждения агента в соответствии с уровнем, ориентированным на поведение. *Ментальная модель* содержит знания о текущем ментальном состоянии агента — его желаниях, локальных целях, намерениях, планах. Наконец, *социальная модель* содержит знания и убеждения агента о других агентах, информацию о совместных целях, намерениях, планах. Внутри БЗ возможен лишь доступ с верхних уровней к нижним.

Общее управление поведением осуществляется коммуникациями между иерархическими уровнями. При некотором входном событии агент пытается распознать ситуацию во внешнем мире, и управление постепенно сдвигается снизу вверх до тех пор, пока не достигнет уровня, способного справиться с возникшей ситуацией.

Существует три варианта реакции агента на внешние события:

- если в базе знаний агента хранится возможная реакция на текущую ситуацию, она осуществляется сразу реактивным уровнем;
- в нестандартных ситуациях идет обращение к системе локального планирования, где и конструируется план;
- реакция с использованием уровня кооперативного планирования, когда поиск плана с уровня локального планирования перемещается выше.

Онтология агентов

Поведение агентов определяется не только входными данными, но и встроенной базой знаний — онтологией.

Согласно классическому определению Грубера [26], *онтология* — это эксплицитная, т. е. явная, спецификация концептуализации предметной области. *Концептуализация* — процесс создания концептуальной моде-

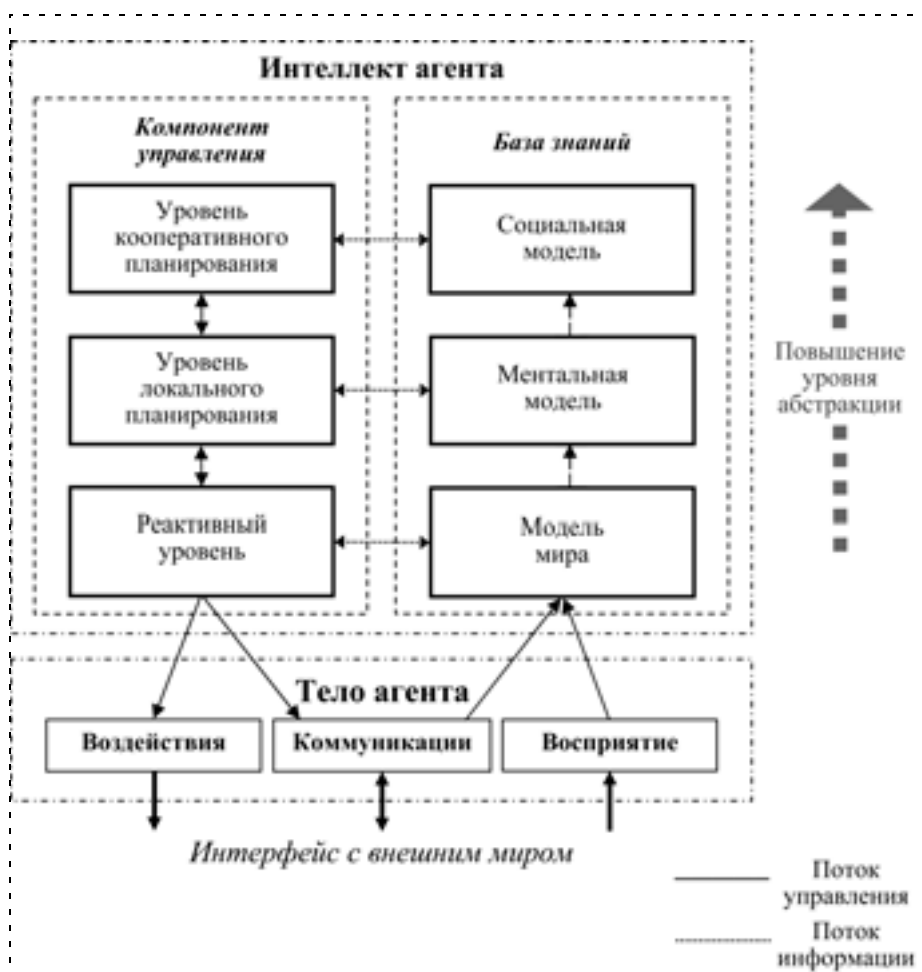


Рис. 2. InteRRaP-архитектура агента

ли для описания и решения задач в избранной предметной области. Здесь концептуальная модель представляет собой систему концептов и отношений предметной области, причем концепт — понятие, отражающее некоторый конкретный или абстрактный объект реального мира.

В общем виде структура онтологии включает следующие компоненты:

- концепты (понятия, классы, сущности, категории);
- слоты — свойства концептов (атрибуты, роли);
- фацеты — ограничения, наложенные на слоты;
- домены — классы, к которым слот привязан, или классы, свойство которых слот описывает;
- отношения между концептами (связи, зависимости, функции);
- аксиомы.

Аксиомы выражают очевидные утверждения, связывающие понятия и отношения. Они вводятся в онтологию в готовом виде и позволяют осуществлять умозаключения в рамках онтологии. Аксиомы могут также представлять собой ограничения, накладываемые на какие-либо отношения, делающие возможным выведение умозаключений. Это могут быть понятийные или числовые ограничения.

Онтология вместе с набором индивидуальных экземпляров классов образует базу знаний. Различают следующие типы онтологий:

- *метаонтология* — содержит наиболее общие понятия и отношения, не зависящие от предметной области ("объект", "свойство", "значение" и т. п.), семантически значимые для данной предметной области;
- *предметная онтология* — содержит понятия, описывающие конкретную предметную область и отношения;
- *онтология задачи* — определяет общую терминологическую базу задачи.

Агенты имеют возможность считывать из онтологии предметные знания и динамически настраиваться на решение определенных задач и общаться между собой.

FIPA-стандарты построения мультиагентных систем

Для обеспечения *интероперабельности* агентов и агентных сервисов необходима стандартизация агентных систем и технологий. С этой целью создана международная организация FIPA (Foundation for Physical Intelligent Agents) [40]. Она стандартизует механизмы коммуникации агентов, транспортировки сообщений, управления агентами, а также определяет абстрактную архитектуру MAS.

Агентная платформа — это промежуточный исполнительный уровень (middleware) между агентами и операционной системой. MAS работает "по-

верх" агентной платформы и использует ее сервисы.

Основные функции агентной платформы:

- является средой, в которой живут агенты;
- предоставляет агентам базовые сервисы;
- обеспечивает взаимодействие агентов;
- поддерживает онтологии;
- управляет агентами;
- осуществляет поиск агентов и данных о них внутри системы;
- обеспечивает взаимодействие с другими платформами и др.

Архитектуру агентной платформы в соответствии со спецификациями FIPA поясняет схема на рис. 3. Она включает систему управления агентами, сами программные агенты, менеджер директорий и службу транспортировки сообщений.

Система управления агентами (СУА) — агент, осуществляющий контроль доступа и использования агентной платформы. В каждой агентной платформе присутствует одна СУА, которая предоставляет сервис жизненного цикла программных агентов и их реестр с идентификаторами, а также содержит состояния каждого программного агента.

Менеджером директорий является программный агент, который обеспечивает направление запросов в другие агентные платформы.

Система транспортировки сообщений, или канал коммуникации агентов, является программным компонентом для управления потоками сообщений как внутри, так и между агентными платформами.

Стандарты FIPA не затрагивают архитектуру и способ реализации отдельного агента, что оставляет разработчикам широкий выбор.

Спецификация FIPA Ontology Service specification определяет основные аспекты моделирования взаимодействия агентов, основанного на онтологиях.

При проектировании и реализации модулей агентов подразумевается использование элементов абстрактной архитектуры FIPA. Для взаимодействия агентов необходим язык коммуникаций. Пере-



Рис. 3. FIPA-модель агентной платформы

дача сообщений между ними происходит поверх ТСР-протокола. Каталог агентов является обязательным только для агента, координирующего действия других. Агенты могут управлять другими модулями с помощью сообщений.

Распределенные мультиагентные системы

В распределенной МАС агенты могут располагаться на разных информационных узлах системы. При реализации архитектуры клиент/сервер агенты могут относиться к клиентской либо серверной и клиентской частям распределенной системы.

Агентская система может поддерживать понятие *места* (place). В этом случае сеть компьютеров рассматривается как набор мест, предоставляющих сервисы. Вместе с тем, место является контейнером и фабрикой агентов. Агент "порождается" в месте и "умирает" в месте.

Агенты способны выключаться ("умирать") сами или по команде сервера, который переносит их после этого из контекста в место, предназначенное для хранения. После включения агент автоматически переносится в контекст, где он работал в последний раз. Уничтожение агента прекращает его исполнение и исключает его из текущего контекста.

В течение жизненного цикла агент перемещается между местами. Сервисы, предоставляемые местом, используются агентами, находящимися в нем. Место может накладывать ограничения на ресурсы, которые используют агенты, находящиеся в нем. Места могут существовать как на стороне клиента, так и на стороне сервера. Место может хранить "следы" посещавших его агентов. Агент может содержать "историю" своей жизнедеятельности.

Агент, осуществляющий координацию, может быть привязан к конкретному серверу, и тогда он называется "*местом встречи агентов*". Место встречи агентов (AMP — Agent Meeting Place) — это агент, играющий роль брокера между агентами, запрашивающими некоторые ресурсы, которыми обладают другие агенты, и теми агентами, которые эти ресурсы могут предоставить. Архитектура AMP есть архитектура обычного агента, дополненная некоторыми вспомогательными компонентами, наличие которых обусловлено ролью этого агента как координатора взаимодействия других агентов. Эти вспомогательные компоненты должны, с одной стороны, содержать унифицированное описание множества доступных через AMP агентов и их возможностей (ресурсов, функций и пр.) и, с другой стороны, организовывать унифицированный доступ к ним.

Сами агенты как программные компоненты единой сложной системы передают данные и исполняемый код алгоритмов управления по сети с помощью стандартных средств межсетевое взаимодействия. Таким образом, в механизм управле-

ния добавляется новая возможность воздействия на состояние объекта путем передачи не самого регулирующего сигнала, а программного компонента, реализующего алгоритм управления. В результате этот компонент получает оперативные данные о состоянии объекта уже непосредственно в точке, где необходимо реализовать требуемое воздействие. При этом в алгоритме могут учитываться координирующие воздействия от других компонентов.

Особенности агентно-ориентированных систем

Завершая обсуждение агентного подхода, остановимся на ключевых отличиях агентно-ориентированных систем от традиционных программных систем.

С точки зрения объектно-ориентированного программирования (ООП) агент можно рассматривать как объект с интерфейсом, который способен обмениваться информацией с внешним миром, принимать решения и воздействовать на внешний мир. Суть объекта выражается формулой

"объект = данные + методы",

т. е. каждый объект инкапсулирует как описывающие его данные, так и методы — средства обработки этих данных.

Понятие интеллектуального агента можно трактовать согласно формуле

**"интеллектуальный агент =
=данные + методы + знания",**

причем методы здесь — это функции работы с данными и знаниями, а также процедуры воздействия на внешний мир.

Характерные свойства традиционных программных систем следующие:

- компьютерные программы являются чисто реактивными: реализуют последовательные алгоритмы, их выполнение детерминировано и определено программным кодом. Для любых корректных входных данных будет получен предсказуемый результат;
- компьютерные программы могут правильно функционировать только в условиях полностью предсказуемого окружения. Для того чтобы они выполнялись, необходимы входные данные в полном объеме;
- проектирование программной системы основано на декомпозиции ее на более или менее независимые части (классы, модули, компоненты, сервисы) таким образом, чтобы в дальнейшем все ее возможные изменения были локальными и не требовали перепроектирования всей системы;
- обычная вычислительная программа запускается на ЭВМ, получает входные данные, выполняется как последовательность заранее написанных команд, выводит результат. До следую-

шего запуска извне она пребывает в состоянии "комы";

- программа реального времени функционирует (запускается, приостанавливается, возобновляется, завершается, запускается вновь) в соответствии с внешним, физическим временем. Программа взаимодействует с окружением (получает и передает информацию) посредством интерфейсов, т. е. она влияет на окружающую среду и испытывает, в свою очередь, влияние окружающей среды.

Иначе устроены МАС: их агрегированное поведение обусловлено свойствами и локальными взаимодействиями агентов.

Базовая архитектура интеллектуального агента включает в себя внутреннюю среду агента, собственную базу знаний и компоненты приобретения знаний, алгоритмы решения предметно-ориентированных задач, принятия решений, управления поведением агента, интерфейс с внешней средой: материальными объектами, пользователями и другими агентами.

Агенты отличаются от традиционных программ следующими характеристиками:

- 1) обладают механизмом целеобразования, т. е. самостоятельного формирования целей;
- 2) располагают индивидуальной моделью окружающего его мира (среды), воспринимают и осознают окружающую действительность на основе этой модели;
- 3) строят свою модель мира на основе информации, которую получают из внешней среды;
- 4) способны улучшать свою работу и адаптироваться к изменениям в окружении благодаря обучению;
- 5) способны общаться с другими агентами.

Хотя агенты и представляют собой некоторые алгоритмы, они постоянно взаимодействуют с другими агентами путем обмена сообщениями, а этот процесс не является алгоритмическим. Результаты взаимодействия агентов не детерминированы, но зависят от правил поведения агентов, предписанных онтологией, причем эти правила должны гарантировать получение устойчивого решения в процессе функционирования системы для каждой возможной ситуации.

Идея делегирования сложных задач программным агентам позволяет представлять и решать трудно формализуемые проблемы более естественным образом. Кроме этого, агентная архитектура обладает серьезным потенциалом дальнейшей модернизации системы и расширения ее функциональных возможностей.

В отличие от традиционной методологии проектирования "сверху вниз" для МАС применим подход проектирования "снизу вверх". Действительно, такие системы способны к самоорганизации: при взаимодействии агентов образуются логически связанные устойчивые структуры, которые могут стать компонентами более сложных

возникающих структур и приводить к иерархии возникающих структур и их масштабируемости [8].

Список литературы

1. **Акулов В. Б., Рудаков М. Н.** Теория организации. Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. 142 с.
2. **Бугайченко Д. Ю., Соловьев И. П.** Абстрактная архитектура интеллектуального агента и методы ее реализации // Системное программирование. 2005. № 1. С. 36–67.
3. **Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001. 384 с.
4. **Галкина Т. П.** Социология управления: от группы к команде. М.: Финансы и статистика, 2004. 224 с.
5. **Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В.** Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.
6. **Жмурко С. А.** Основные принципы и модели построения многоагентных систем // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2008. № 2. С. 4–14.
7. **Люгер Дж. Ф.** Искусственный интеллект: стратегия и методы решения сложных проблем. М.: Изд. дом "Вильямс", 2005. 864 с.
8. **Поспелов Д. А.** Многоагентные системы — настоящее и будущее // Информационные технологии и вычислительные системы. 1998. № 1. С. 14–21.
9. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход. М.: Изд. дом "Вильямс", 2007. 1408 с.
10. **Ржевский Дж.** Мультиагентные системы в логистике и e-коммерции // International Conference on Intelligent Manufacturing. Wuhan, China, 1995.
11. **Рыбина Г. В., Паронджанов С. С.** Моделирование процессов взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 3. С. 3–15.
12. **Смирнов А. В., Шереметов Л. Б.** Многоагентная технология проектирования сложных систем // Автоматизация проектирования: Часть 1. 1998. № 3. С. 45–50; Часть 2. 1999. № 1. С. 42–46.
13. **Солсо Р. Л.** Когнитивная психология. М.: Тривола, 1996. 600 с.
14. **Стефанюк В. Л.** Поведение многоагентных систем: парадигма координации // Новости искусственного интеллекта. 1997. № 4. С. 92–104.
15. **Тарасов В. Б.** Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 5–64.
16. **Тарасов В. Б.** От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
17. **Фролов С. С.** Социология организаций. М.: Гардарики, 2001. 384 с.
18. **Швецов А. Н.** Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению "Информационно-телекоммуникационные системы", 2008. 101 с.
19. **Швецов А. Н., Яковлев А. Н.** Распределенные интеллектуальные информационные системы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2003. 318 с.
20. **Braspenning P.** Plant-like, Animal-like and Humanoid Agents and Corresponding Multi-Agent Systems // Proc. of the Internat. Workshop "Distributed Artificial Intelligence and Multi-Agent Systems" (DAIMAS'97, St. Petersburg, Russia, June 15–18, 1997). P. 64–77.
21. **Brooks R. A.** Intelligence without Representation // Artificial Intelligence. 1991. N 47. P. 139–159.
22. **Clerc M.** Particle Swarm Optimization. ISTE, London, UK, 2006.
23. **Etzioni O., Weld D.** Intelligent Agents on the Internet // IEEE Expert. 1995. N. 4.
24. **Ferber J.** Simulating with Reactive Agents // In: Hillebrand & Stender. Proceedings Conf. Many Agent Simulation and Artificial Life, Amsterdam: IOS Press, 1994. P. 8–28.

25. **Genesereth M. R.** Logical Foundations of Artificial Intelligence / M. R. Genesereth, N. Nilsson. Los Altos: Morgan Kaufmann, 1987. 405 p.
26. **Gruber T. R.** A Translation Approach to Portable Ontologies // Knowledge Acquisition. 1993. V. 5(2). P. 199–220.
27. **Hofbauer J., Sigmund K.** Evolutionary Games and Population Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
28. **Jennings N. R., Wooldridge M. J.** Agent Technology. Berlin: Heidelberg, New-York: Springer-Verlag, 1998.
29. **Maes P.** Artificial Life Meets Entertainment: Life Like Autonomous Agents // Communication of the ACM. 1995. V. 38. N 11. P. 108–114.
30. **Maynard Smith J.** Evolution and the Theory of Games. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
31. **Muller J. P.** The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
32. **Murray D.** Developing Reactive Software Agents // AI Expert. 1995. P. 27–29.
33. **Nowak M. A., Sigmund K.** Evolutionary Dynamics of Biological Games // Science. 2004. V. 303. P. 793–799.
34. **Nwana H. S.** 1996. Software Agents: An Overview // The Knowledge Engineering Review. 1996. V. 11. N. 3. P. 1–40.
35. **Smith R. G.** The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver // IEEE Trans. on Computers. 1980. C-29(12). Dec. P. 1104–1113.
36. **Stankevitch L. A.** A Cognitive Agent for Soccer Game // Proceeding of First Workshop of Central and Eastern Europe on Multi-agent Systems. CEEMAC'99. S-Petersburg, 1999.
37. **Wooldridge M., Jennings N.** Intelligent Agents: Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. 1995. V. 10. N 2. P. 115–152.
38. **Wooldridge M. J.** An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons Ltd, 2002. 366 p.
39. **Swarm** Development Group. URL: <http://www.swarm.org>.
40. **Foundation** for Intelligent Physical Agents .URL: <http://www.fi.pa.org>.

УДК 004.89:004.4

М. В. Андреев¹, специалист,
А. В. Иващенко¹, канд. техн. наук,
гл. эксперт по технологии,

Д. М. Мартышкин², аспирант,

П. О. Скобелев², д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,

Л. В. Уланова¹, специалист,

А. В. Царев¹, зам. ген. директора по технологии,

¹ Научно-производственная
компания "Генезис знаний"

² Институт проблем управления
сложными системами РАН
at@kg.ru

Применение мультиагентных технологий динамического планирования персональных задач при организации коллективного взаимодействия в автоматизированных системах управления распределением ресурсов

Описываются особенности и преимущества применения мультиагентных технологий динамического планирования персональных задач мобильных пользователей в автоматизированных системах управления распределением ресурсов для обеспечения коллективного взаимодействия участников принятия согласованных решений.

Ключевые слова: мультиагентные системы, онтологии, коллективное взаимодействие, динамическое планирование

Введение

Широкое распространение мобильных телефонов и других "наладонных" устройств в последнее время внесло существенный вклад в развитие

техносферы. Стремительный прогресс в области Интернет-систем, мобильной связи и спутниковой GPS/ГЛОНАСС-навигации открывают новые возможности для решения многих проблем поддержки коллективного взаимодействия [1] пользователей автоматизированных систем в задачах управления распределением производственных и мобильных ресурсов.

Современный сотовый телефон все чаще воспринимается не только как средство связи, но и как полнофункциональный компонент сложной мехатронной системы автоматизации планирования и контроля исполнения задач в реальном масштабе времени. Простота использования мобильных устройств и широкие возможности по их интеграции с системами телеметрии позволяют решать задачи динамического управления мобильными ресурсами в транспортной логистике [2], при управлении производством [3] и организации мониторинга функционирования распределенных технических систем.

В то же время в распределенных автоматизированных системах управления становится все важнее привлечение участников-исполнителей производственных заданий в процесс коллективного взаимодействия по принятию управленческих решений. С учетом высокой динамики и изменчивости бизнес-процессов становится крайне важно поддерживать постоянную связь в распределенной сети предприятия и своевременно получать информацию о происходящих событиях.

В связи с этим весьма актуальной является задача разработки новых методов и средств динамического планирования персональных задач, позволяющих автоматически создавать и изменять формирующееся расписание событий средствами мобильного устройства (например, телефона) с учетом структуры и взаимосвязей задач и возможности их исполнения в зависимости от местонахождения пользователя. При этом особое внимание

следует уделять обеспечению удобства, гибкости и эффективности инструментария динамического планирования, для чего необходимо использовать возможности современных мультиагентных технологий и онтологий.

В данной статье описываются результаты применения мультиагентных технологий для решения поставленной задачи, которые были получены при выполнении работ по теме "Разработка мультиагентной системы динамического планирования персональных задач для мобильных пользователей" (шифр "2009-04-1.4-00-07-012"), выполняемой в рамках ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы".

Особенности автоматизации планирования персональных задач

Возможности современных календарей [4], встроенные версии которых имеются практически на каждом телефоне или компьютере, как правило, связаны лишь с хранением информации о задачах и времени их исполнения. В лучшем случае эти системы могут быть средством напоминания, подавать сигнал пользователю в заранее заданный момент времени, подобно обычному будильнику. Если же запланированное событие (например, встречу) не удается провести в назначенный день и час, то пользователь должен сам вручную перенести это событие на другой день, меняя время в описании события. При этом пользователь должен принимать во внимание возможные конфликты с другими задачами, в том числе и неявные, что возможно далеко не всегда.

Указанные проблемы существующих электронных календарей делают в итоге планирование весьма сложным и трудоемким и не позволяют пользователям эффективно управлять своим временем. Это справедливо в случае, когда эффективное планирование является важнейшей частью профессиональных компетенций, например, для руководителей и бизнесменов, менеджеров, ученых и преподавателей, юристов и т. д. В особенности это касается исполнителей задач, от которых требуется согласованное взаимодействие: водителей транспортной компании, мастеров по ремонту и обслуживанию трубопроводов и распределенных сетей и т. п. Для устранения этих недостатков необходимо при построении автоматизированной системы планирования персональных задач использовать новые мультиагентные технологии.

Рассматриваемые пользователи обычно используют расписание, содержащее разнородные задачи, которые можно группировать по типу или виду решаемой проблемы. Пользователь должен иметь возможность планирования задач существующих типов, определения последовательности их следования, а также создания новых типов задач и их

описания с помощью атрибутов. Разрабатываемая система должна, с одной стороны, предоставлять возможность такого гибкого описания, а с другой стороны, "понимать" особенности этого описания и адаптировать логику автоматического планирования персональных задач в соответствии с внесенными изменениями. Необходимо предусмотреть, чтобы в системе поддерживалось актуальное расписание: в случае, если подходит время выполнения задачи, нужно уведомлять об этом пользователя и спрашивать, нет ли необходимости перепланирования.

Также пользователи сильно заинтересованы в наличии готовых шаблонов достижения целей, которые перед ними ставятся. В случае, если возникает проблема, которую другой пользователь уже смог успешно решить, система должна найти такое решение, создать цепочки взаимосвязанных задач в соответствии с имеющимся опытом и встроить их в существующее расписание в процессе планирования. Это можно обеспечить с помощью шаблонов задач, описываемых в онтологии. Описание задач, шаблонов их выполнения и логики планирования можно проводить с помощью специального компонента мультиагентной системы динамического планирования персональных задач — редактора онтологий и правил. Этот компонент имеет удобный desktop-интерфейс и может быть установлен на домашнем или рабочем компьютере.

Планирование и управление исполнением задач удобнее выполнять с помощью мобильных устройств (терминалов), в качестве которых могут выступать обычные сотовые телефоны. На терминалах необходимо поддерживать расписание в актуальном состоянии, а также предоставлять возможность простого редактирования, которое не требует пересмотра всего расписания, но при этом позволяет рассматривать разные варианты планов.

Связь мобильных устройств с сервером должна поддерживаться постоянно и обеспечивать синхронизацию расписаний и интеллектуальное перепланирование, для чего требуется предусмотреть службу уведомлений о происходящих событиях. Информация о таких событиях должна приходиться с мобильных устройств или персональных компьютеров пользователей системы и обрабатываться мультиагентной системой планирования (планировщиком). В результате перепланирования планировщик может изменять частично или полностью расписание одного или нескольких пользователей и выполнять соответствующие обновления на их терминалах.

Использование мобильных терминалов для ввода событий позволит своевременно обновлять расписание в режиме реального времени. Редактор онтологий позволит более адекватно и полно описывать знания, необходимые для настройки алгоритмов планирования. Использование мультиагентной платформы в качестве единого центра обработки данных и принятия решений позволит

обеспечить согласованную обработку информации, поступающей от разных пользователей.

Пользователь с помощью своего мобильного устройства может одновременно обращаться к одному или нескольким серверам в зависимости от способа развертывания системы (это можно делать по территориальному признаку, по типу решаемых задач). Такая архитектура в перспективе может позволить оптимизировать распределение пользователей по серверам и обеспечить высокие характеристики в части производительности.

Основные особенности предлагаемого подхода

Анализ методов реализации требований к мультиагентной системе динамического планирования персональных задач для мобильных пользователей позволил сформировать концептуальную архитектуру системы в виде модели ее компонентов (рис. 1).

Расписание пользователя представляет собой сложную динамическую структуру данных, являющаяся частью сцены мира пользователя. Сцена мира активного пользователя, включившего режим планирования, постоянно находится в оперативной памяти сервера, непрерывно изменяясь под действием различных внешних или внутренних событий, и периодически сохраняется в многопользовательской базе данных.

Пользователь мультиагентной системы динамического планирования задач имеет возможность формировать свои расписания на основе личных целей, профессиональных компетенций, предпочтений и ограничений. Например, человек может захотеть иметь минимум поездок в какой-то день и всегда минимизировать расстояния при поездках. Или пользователь может указать, что работа по продаже продукции является для него приоритетной в какой-то интервал времени, например, на текущей неделе или в заданный день — тогда система постарается продвигать планирование задач именно этого класса в первую очередь. Еще один пример стратегии планирования — стараться минимизировать риски в расписании, т. е. планировать все действия с запасом времени.

Кроме того, пользователь может давать определенные задачи системе по изменению формируемых расписаний в интерактивном режиме, кото-

рые воспринимаются системой как пожелания — например, постараться освободить вторник для важной работы или уплотнить все задачи в расписании. При определенных условиях пожелания пользователя могут быть не выполнены — в этом случае пользователь получит отказ в изменении расписания.

На рис. 2 представлен пример отображения личного расписания пользователя на экране мобильного телефона и его изменения в случае появления нового события — неотложного телефонного звонка. В результате автоматического перепланирования последовательное интеллектуальное разрешение конфликтов приводит к отмене обеда и переносу совещания. Однако поскольку перенос авиаперелета на более поздний срок невозможен, совещание можно сдвинуть по времени лишь на 30 минут, следовательно, и планируемый телефонный звонок потребует сделать немного раньше (в 11:30), чем было указано в момент поступления информации о планируемом событии.

Задание стратегий принятия решений позволяет определить внутренние механизмы планирования и исполнения задач в системе, например, планирование может осуществляться "точно в срок" или "как можно быстрее", а также комбинированным способом или, например, отталкиваясь от наиболее "узких мест" в расписании.

Для облечения использования системы можно предложить следующие режимы работы планировщика:

- ручной режим — пользователь сам планирует все задачи, указывая их размещение в расписании;
- "советник" — пользователь планирует сам, но система дает предложения и напоминания на основе семантических представлений о мире пользователя;
- автоматическое планирование — пользователь вводит задачи и события, а система автоматически планирует и вносит все изменения;
- "поводырь" — система постоянно запрашивает подтверждения и уточнения от пользователя, максимально контролируя все задачи и добиваясь их максимального исполнения.

Представление расписания

Поскольку построение и корректировка плана всегда сочетается с его исполнением в реальном времени, расписание пользователя необходимо представлять в виде динамической, непрерывно "расширяющейся" (continuously rolling) структуры данных. В ходе работы пользователя к расписанию постоянно добавляются новые дни с новыми задачами и делами, а старые, отработанные, удаляются. Кроме того, часть операций может быть составной, представляя собой параллельно идущие нити работ пользователя, и раскрывать-



Рис. 1. Модель компонентов системы

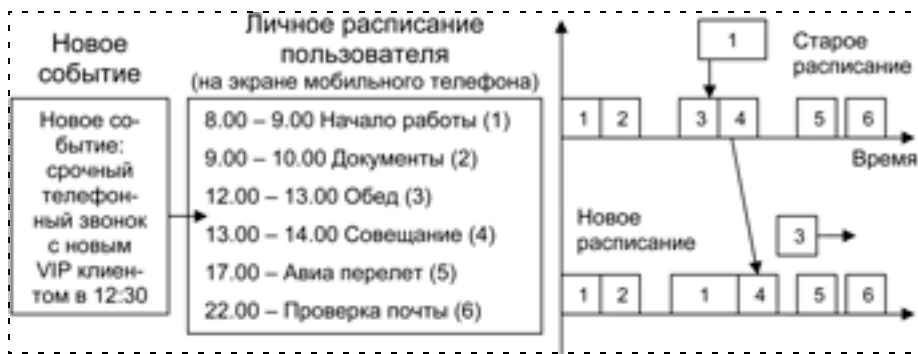


Рис. 2. Планирование персональных задач

ся на следующем уровне декомпозиции. Расписание следует хранить в виде семантической сети связей задач, операций, ресурсов и результатов пользователя, что позволяет отслеживать зависимости между операциями и разрешать конфликты в расписании.

Для создания сложных сценариев действий и разрешения конфликтов между ними в ходе динамического планирования в онтологиях задаются следующие временные отношения между действиями, входящими в состав задач:

- ЗАПУСК (D_1, T_1) — жесткий запуск действия D_1 в момент времени T_1 . Если на данный момент времени запланировано другое действие, то оно должно быть перепланировано (сдвинуто или перемещено) на другой срок;
- МЗАПУСК (D_1, T_1) — мягкий запуск действия D_1 в момент времени T_1 . Если в данный момент времени запланировано другое действие, то необходимо решить, какое действие — имеющееся или новое — будет перепланировано (сдвинуто или перемещено на другой срок);
- ПСЛЕД (D_1, DT, D_2) — простое следование (ПС) действия D_2 за действием D_1 , означающее, что как только D_1 завершится, следует через интервал времени DT запустить D_2 (при этом DT может быть функцией или константой);
- СИНХ ($D_1, D_2, \dots, D_n; DT, D_{n+1}$) — синхронное следование (СС) действия D_{n+1} после завершения всех действий D_1, D_2, \dots, D_n через интервал DT ;
- АСИНХ ($D_1, D_2, \dots, D_n, DT, D_{n+1}$) — асинхронное следование (АС) действия D_{n+1} после завершения хотя бы одного из действий D_1, D_2, \dots, D_n через интервал DT ;
- ДО (D_1, DT, D_2) — запланировать действие D_1 так, чтобы оно успело выполниться не позже чем за время DT до момента начала D_2 ;
- ПАР (D_1) — параллельное исполнение действия D_1 по отношению к любым другим действиям в расписании пользователя;
- СВОБ (D_1) — запускать действие D_1 только в свободное время.

Знание временных отношений между действиями или задачами позволяет системе согласованно перепланировать время их выполнения в случае

возникновения различного рода событий.

Действия могут запускаться:

- при наступлении заданного абсолютного момента времени или истечения относительного интервала времени;
- в момент начала или завершения выбранного действия (например, завтрака);
- при поступлении приглашения на встречу, электронного письма или sms-сообщения от

выбранного отправителя на заданную тему или по заданному имени вложенного файла;

- в момент завершения звонка от выбранного абонента.

Физически сцена мира и расписание хранятся в памяти как многосвязные списки с индексами (панелями) по объектам, отношениям и процессам. В этой структуре данных каждый концепт, в свою очередь, описывается набором свойств и атрибутов с присущими им значениями, и его можно быстро найти как по индексу, так и последовательно перемещаясь от объекта к отношению, от отношения к процессу и т. д.

Для фрагментарного отображения сцены возможно использование компонентов, позволяющих просмотреть расписание в простом табличном виде, в виде списка с взаимосвязанными задачами или в виде диаграммы Ганта.

Описание основных агентов

Архитектура мира агентов планирования предполагает наличие набора агентов с конфликтными интересами. При этом используется холистический подход: агент дня включает в себя агенты задач и временных интервалов, агент недели — агенты дней, а каждый уровень имеет свои интегральные показатели эффективности планирования (стоимость, риск и т. д.).

Рассмотрим подробнее набор используемых агентов.

Агент дня (ресурса времени) отвечает за качество плана на день и регулирует процессы планирования в соответствии с общими установками или конкретными требованиями пользователя. Этот агент создается агентом недели, открывает и потом закрывает день для планирования задач, рассчитывает общие параметры расписания, задает стратегии планирования другим агентам, создает или удаляет агентов доступных ресурсов времени (если пользователь делает интервал недоступным), вызывая перепланирование задач на другие интервалы, и ведет оценку результатов.

Агент интервала времени выбирает подходящие задачи и старается экономно использовать время пользователя. Агенты интервалов могут иметь предпочтения по поводу того, какие задачи и в ка-

кое время подходят пользователям, например, пользователь может предпочесть утром работать с документами, а после обеда планировать совещания и другие работы (предпочтения могут приходиться от агента дня, недели и т. д.). Если интервал, уже забронированный под задачу, пытается захватить другая задача, то интервал вступает в переговоры с уже забронированными на нем задачами и решает, следует ли ему освободить себя для новой задачи, или остаться с существующими.

Хранитель времени — это базовый агент времени, заведующий выделением интервалов под задачи, их разделением и слиянием, а также соответствием между запрашиваемым и выделяемым интервалом времени, например, в зависимости от желания или состояния пользователя, накопления усталости от выполненных за день задач и т. д. Хранитель времени может периодически просматривать расписание и выявлять "подозрительные" участки, которые затем пытаются перестроить путем побуждения интервалов времени к слиянию или вытеснению одиночных задач для более эффективного использования времени.

Агент составной задачи отвечает за задачу "как целое", оценивая общую возможность начать планирование составной задачи на день (экспресс-оценка), создавая подзадачи и действия, координируя их планирование и удаляя (отзывая) все свои задачи в случае их отмены.

Агент простой задачи ищет наилучшее размещение на агентах ресурсов времени в соответствии со своим предпочтением или фиксированным временем. Если интервал занят, начинаются переговоры по задержке других задач или их перемещению на другие интервалы.

Агенты целей просматривают периодически создаваемое расписание для оценки его качества, эффективности, стоимости, риска и т. д. Выработанные оценки позволяют изменять стратегии планирования для агентов определенного типа или конкретных агентов расписания. Например, если не получается выполнить важные задачи на день, необходимо пересмотреть и сократить буфер времени, а если, наоборот, обнаруживается большой риск в расписании, нужно увеличивать буферы безопасности между задачами.

Логическая архитектура системы

Мультиагентная система для динамического планирования задач пользователя содержит три основных компонента:

- мир агентов, в котором существуют и взаимодействуют между собой экземпляры программ, реализующие все требуемые функции агентов;
- исполняющую систему, которая управляет работой агентов и включает подсистему коммуникаций и диспетчер, передающий управление между агентами от одного состояния к другому внутри одного агента;

- внешние компоненты, к числу которых могут относиться модули ввода информации, работы с базой данных, отображения результатов и т. д.

В этой архитектуре агенты могут как взаимодействовать между собой в мире агентов, так и иметь доступ к внешним компонентам при поддержке исполняющей системы. Важным элементом архитектуры системы является сцена мира, которая хранится как отдельная структура данных. Агенты могут работать со сценой мира параллельно и асинхронно, а именно, читать и изменять сцену, получать нотификацию об изменениях в сцене, блокировать доступ к участкам сцены и т. д. Агенты могут обладать собственной памятью, в которой хранят исходную информацию для принятия решений, промежуточные опции решений и связи, а также результаты своей работы.

В первой версии планировщика предполагается "квазипараллельная" синхронная работа агентов, предполагающая разделение времени одного процессора: агент получает управление, выполняет переход из одного состояния в другое и отдает управление диспетчеру исполняющей системы, который запускает работу следующего агента. Тем самым, в системе постоянно ведется очередь агентов, которые работают в данный момент времени — при этом агент, пославший запрос другому, автоматически ставится в очередь ожидающих, и будет активирован лишь по поступлению ответного сообщения.

Синхронность работы агентов означает, что по приходу события диспетчер последовательно активирует фазы реакции на событие, планирования и исполнения планов вовлекаемых агентов, которые либо сразу по очереди вносят изменения в сцену, либо сначала договариваются обо всех изменениях в сцене, а уже потом применяют эти согласованные изменения. При этом новое событие на вход планирования не вводится до тех пор, пока обработка предыдущего не будет полностью завершена.

Например, если отменилась некоторая задача, то ее агент найдет в сцене соответствующий объект, оповестит агентов всех связанных с ней последующих задач и удалит соответствующий объект из сцены, освободив тем самым место для других задач, — все эти действия осуществляются за один такт. Агенты оповещенных задач активируются, обнаружат новое событие, сбросят свои связи с данной задачей и начнут по очереди заново планироваться и искать себе слоты времени.

Таким образом, при работе системы по вновь возникающему событию последовательно образуется и корректируется группа согласованно работающих агентов, которая в ходе взаимодействий находит решение проблемы, соответственно на это время и "вспыхивает" локальный эмерджентный "интеллект", который можно измерить по ряду параметров качества и эффективности решений. В будущем предполагается, что эта "команда" агентов может быть динамически распределена по раз-

ным процессорам для ускорения выполнения всех вычислений, и работа такой команды может идти асинхронно с остальными командами, работающими над другими проблемами, с последующей обработкой решений на общем процессоре.

Параметры и микроэкономика задач

При создании новой задачи определяются следующие параметры:

- наименование задачи;
- класс задачи — выбирается из раскрывающегося меню, если оно есть, или же пользователем создается новый класс задачи под самыми общими классами (бизнес, спорт, медицина и т. д.). Для пользователей, которые не могут указать класс, может указываться "неизвестно" (эта информация будет потом обрабатываться для генерализации в конструкторе онтологий);
- желаемое время старта задачи; может также указываться как "зависимое" (если есть отношения следования) или "неизвестное" (задача потребует уточнения времени позже);
- длительность задачи: конкретно в часах (минутах) или неопределенная (будет спрашивать о завершении через указываемый в этом случае интервал), в будущем — устанавливаемая на основе предыдущих паттернов;
- для указанного времени может быть указан как жесткий старт (вызывает прерывание всех других задач, если они выдвинулись на время старта данной задачи), так и мягкий старт (позволяющий сначала закончить предыдущие задачи);
- желаемое окно времени, в котором можно двигать задачу бесплатно (может не задаваться, тогда рассчитывается цена за отклонение от желаемого времени);
- виртуальная цена входной задачи от 0 до 100 условных единиц;
- максимум и минимум шкалы бонусов (M_1 , M_2) и штрафов и коэффициенты бонусов (K_1 и K_2) и штрафов за отклонение (K_3 и K_4);
- режим выполнения задачи: доступны несколько описанных выше режимов;
- степень удовлетворенности размещением (вычисляется после установки на слот), отражаемая зеленым цветом (отличное размещение с бонусом), желтым (на границе со штрафом), красным (со штрафом) — числовые границы для расцветки назначаются пользователем;
- виртуальная стоимость размещения задачи (с разбивкой по показателям: сколько "денег" ушло на выкуп слота, переговоры, оплату штрафов для сдвига других задач в некомфортную зону).

На рис. 3 представлена микроэкономическая модель задачи. Следует отметить, что все экономические параметры выставляются всем задачам оди-

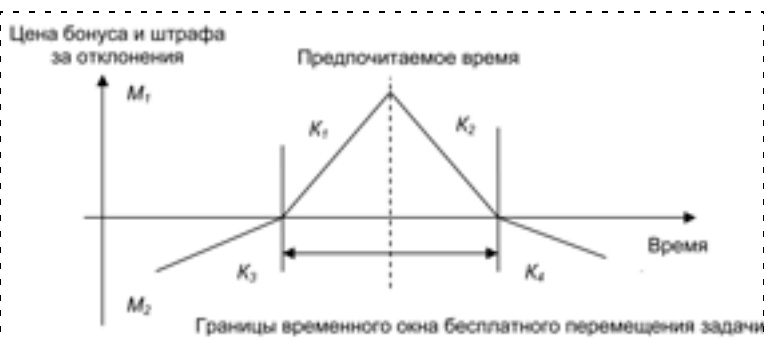


Рис. 3. Микроэкономическая модель задачи

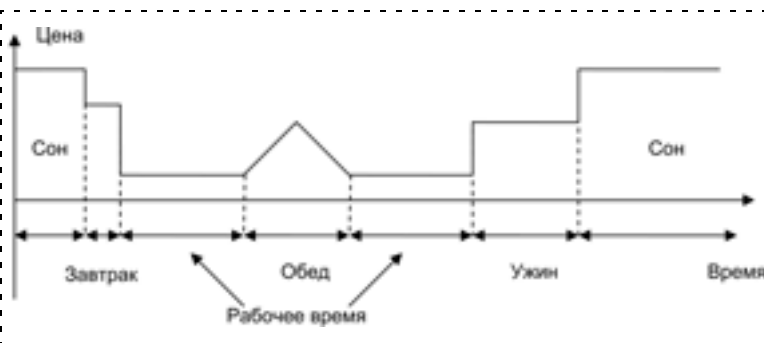


Рис. 4. Виртуальная стоимость свободного времени пользователя

наково по умолчанию и могут легко меняться пользователем, вызывая перепланирование. При этом должна обязательно задаваться цена слотов времени — в разное время дня стоимость слотов может отличаться.

График стоимости слотов времени показывает себестоимость выполнения задач, например, в рабочее время — ниже, а в период принятия пищи или ночное время (сна) — выше (рис. 4).

Заключение

Описанный в данной статье подход позволяет повысить эффективность применения мобильных устройств в автоматизированных системах управления распределением ресурсов, в том числе в сотовых телефонах, при построении систем динамического планирования персональных задач и обеспечить информационно-управляемую целостность в задачах мониторинга, контроля и управления распределенными системами.

Предлагаемые инновационные алгоритмы, базирующиеся на использовании современных мультиагентных технологий, онтологий и технологии GPS позволят качественно разрабатывать автоматизированные системы коллективного взаимодействия и легко адаптировать их к использованию в различных предметных областях за счет пополняемых онтологий.

Список литературы

1. Витих В. А., Скобелев П. О. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени // Автометрия. 2009. № 2. С. 78—87.

2. Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies // AAMAS 2009, Budapest, Hungary. 2009. P. 29–36.

3. Андреев М. В., Иващенко А. В., Скобелев П. О., Царев А. В. Построение адаптивной системы управления предприятием с использованием мультиагентных техноло-

гий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". 2009. № 1(23). С. 5–14.

4. US Patent № 7.418.482 — Web-based task assistants for wireless personal devices. <http://www.patentstorm.us/patents/7418482.html>

УДК 004.8

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

Прямое и обратное преобразование сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах

По аналогии с биологическими процессами предложен подход к прямому и обратному преобразованию сигналов в ассоциативных интеллектуальных машинах (АИМ). Сформулированы новые требования к структуре АИМ. Приведены результаты моделирования. Даны практические рекомендации по использованию предложенного подхода.

Ключевые слова: ассоциативная интеллектуальная машина, нейронная сеть, сигналы, преобразование

Введение

Одной из актуальных научно-практических проблем является создание ассоциативных интеллектуальных машин (АИМ), позволяющих существенно расширить возможности человека как в познавательной, так и созидательной деятельности. В качестве таких машин могут выступать человекоподобные роботы. Они должны быть наделены свойствами восприятия окружающей действительности, мышления, осознанного поведения и взаимодействия с внешним миром. Наделение такими свойствами машин предполагает наличие у них множества различных рецепторов (датчиков информации) и эффекторов (исполнительных устройств). При этом сигналы от различных датчиков в АИМ должны успешно восприниматься нейронной сетью — ее искусственным "мозгом". Кроме того, результаты интеллектуальной обработки информации в нейронной сети необходимо преобразовывать в соответствующие им исходные сигналы.

Известны подходы к преобразованию входной и выходной информации для искусственного "мозга" в интеллектуальных машинах, построенных на цифровых технологиях [1, 2]. Однако они не в полной мере применимы для АИМ. В ассоциативных интеллектуальных машинах требуется учитывать свою специфику обработки в нейронных сетях [2–6]. Особенно это касается рекуррентных сетей. Все известные методы преобразования структурно-

сложных сигналов в интеллектуальных машинах на основе рекуррентных нейронных сетей можно отнести к вырожденным преобразованиям информации. Они не обеспечивают взаимного однозначного соответствия между входом АИМ и ее выходом даже в части повторения таких сигналов (речи, движений, цветных зрительных образов и других). Этим методам свойственны существенные потери информации при ее преобразовании из-за амплитудных и фазовых, частотных и пространственных искажений сигналов.

Причины этого кроются в несовершенстве как моделей используемых нейронных сетей, так и применяемых методов прямого и обратного преобразования сигналов в АИМ.

В основном при обработке сигналов ограничиваются разложением входных сигналов на пространственные составляющие в базисе, согласованном с входным слоем сети [3–5]. В ряде случаев используют разложение по временным сдвигам. Разложение сигналов на частотные и пространственно-частотные составляющие перед подачей в нейронную сеть практически не используют из-за недостаточной проработанности подходов к последующему воспроизведению исходных воздействий. Это существенно ограничивает функциональные возможности АИМ по обработке различных входных сигналов.

В целях снижения потерь и расширения функциональных возможностей по обработке информации в АИМ предлагается новый подход к прямому и обратному преобразованию в них сигналов.

Структурно-функциональные особенности АИС и задача преобразования сигналов

Под ассоциативной интеллектуальной системой предлагается понимать совокупность взаимосвязанных датчиков, нейронной сети — искусственного "мозга" — и исполнительных устройств, предназначенных для обработки информации и взаимодействия с внешним миром в соответствии с воспринимаемыми закономерными связями между отдельными сигналами и их элементами. Обобщенная структура такой АИС приведена на рис. 1, где ИУ — исполнительное устройство.

В качестве датчиков информации в АИС могут выступать зрительные, звуковые, обонятельные сенсоры, измерители давления, температуры, механического перемещения, приемники электриче-

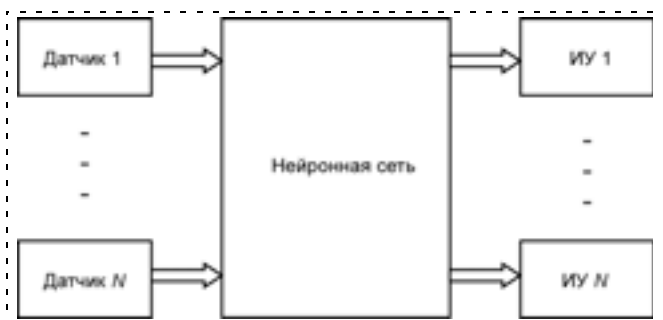


Рис. 1. Обобщенная структура ассоциативной интеллектуальной системы

ских и магнитных сигналов и др. Полагается, что датчики реализуют функции биологических клеток — рецепторов и первичных нейронов, входящих в рецепторную систему. В общем случае датчики воспринимают информацию как о состоянии внешнего мира, так и самой АИС. При обработке этой информации в нейронной сети на ее выходе формируются последовательные совокупности единичных образов, связанные с входными сигналами. Этим совокупностям свойственны свои исходные сигналы, которые должны быть воспроизведены с минимальными потерями. В качестве таких сигналов могут выступать, например, высказывания робота по существу заданного ему человеком вопроса, осознанные движения, направленные на реализацию функций управления подводным или летательным аппаратом, наземным транспортным средством в условиях существенной неопределенности, и др. Исполнительные устройства АИС — это средства воспроизведения этих сигналов: устной и письменной речи, зрительных образов, механических движений, электромагнитных и других воздействий.

В качестве нейронной сети АИС может выступать рекуррентная сеть с обратными связями, замыкающимися двухслойные контуры с временем задержки единичных образов, меньшим времени невосприимчивости нейронов после их возбуждения. Структура такой сети приведена на рис. 2, где ЕЗ — единичные задержки; ДС — динамические синапсы; УС — управление синапсами.

Особенность этой сети в том, что в ней осуществляются управляемые сдвиги совокупностей единичных образов вдоль ее слоев в зависимости от их состояний и обеспечивается приоритетность коротких связей между нейронами. Сдвиги в сети реализуются только в случае, когда между взаимодействующими нейронами при передаче совокупностей единичных образов по коротким связям возникают конфликты.

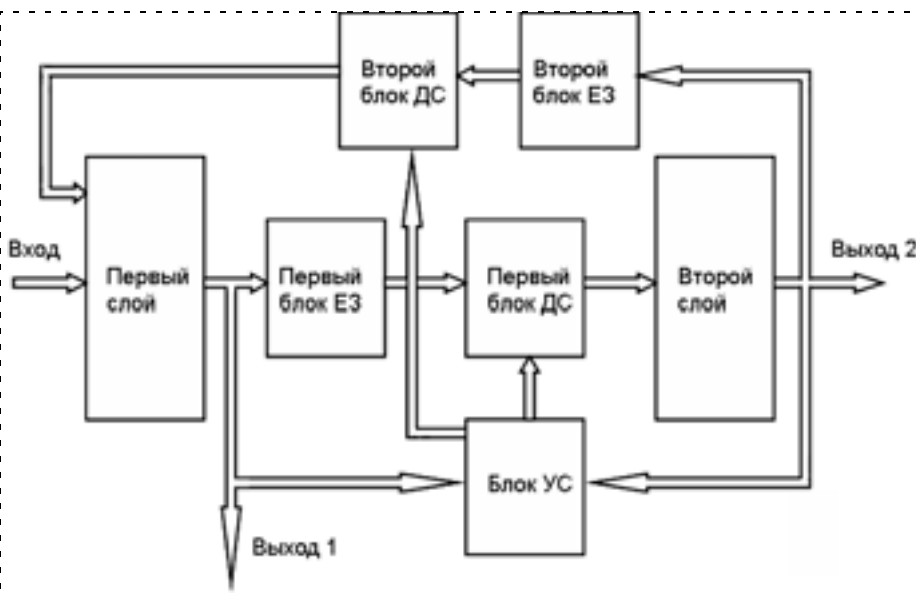


Рис. 2. Двухслойная рекуррентная сеть с управляемыми синапсами

Нейроны сети могут находиться в состояниях ожидания возбуждения, возбуждения и невосприимчивости. За счет постоянных по величине сдвигов совокупностей единичных образов каждый слой сети логически разбивается на одинаковые поля. Информация в сеть вводится через первое поле входного-выходного слоя, а снимается с выходного поля. При этом вводимые в сеть последовательные совокупности единичных образов за счет сдвигов приводятся в ней к одному моменту времени и ассоциируют друг друга. Несмотря на сдвиги совокупностей единичных образов вдоль слоев, в такой сети за счет приоритетности коротких связей устанавливается однозначное соответствие между ее входами и выходами.

Необходимо, чтобы такая нейронная сеть могла воспринимать и обрабатывать различные сигналы, поступающие в АИС, с возможностью последующего воспроизведения их в исходном виде без существенных потерь информации.

Для этого требуется разработать подход к прямому и обратному преобразованию сигналов в АИС, позволяющий снизить потери информации при ее обработке в нейронных сетях и расширить функциональные возможности таких систем.

Схема преобразования сигналов

В целях разработки такого подхода учтем достижения в области биологии. Известно, что оптические, акустические, химические и другие сигналы, воспринимаемые человеком, раскладываются на рецепторах на составляющие. Затем они преобразуются в последовательности единичных образов с частотами повторения, зависящими от амплитуд составляющих, и поступают в нервную систему. Результаты их обработки от нервной системы подаются на эффекторы в виде последовательных со-

вокупностей единичных образов. Принимая это во внимание и используя принцип аналогии, правила прямого и обратного преобразования сигналов в АИС можно представить в виде обобщенной схемы, приведенной на рис. 3.

На этой схеме: $s(t)$ — входной сигнал, при необходимости преобразованный в электрический; $[s_1(t + \tau_1), \dots, s_n(t + \tau_1), \dots, s_N(t + \tau_1)]$ — составляющие, на которые раскладывается входной сигнал; $[\delta_1(t + \tau_2), \dots, \delta_n(t + \tau_2), \dots, \delta_N(t + \tau_2)]$ — окончательный результат прямого преобразования — последовательности единичных импульсов (образов), соответствующие составляющим входного сигнала, поступающие на первое поле входного слоя нейронной сети АИС; $[\delta_1^*(t + \tau_3), \dots, \delta_n^*(t + \tau_3), \dots, \delta_N^*(t + \tau_3)]$ — последовательности единичных образов на выходном поле выходного слоя нейронной сети АИС, вызванные входным сигналом $s(t)$, подвергаемые обратному преобразованию; $[s_1^*(t + \tau_4), \dots, s_n^*(t + \tau_4), \dots, s_N^*(t + \tau_4)]$ — составляющие исходного сигнала, которому соответствуют эти последовательности; $s^*(t + \tau_5)$ — исходный сигнал для них; τ_1, \dots, τ_5 — временные задержки. Заметим, что $s^*(t + \tau_5)$ в общем случае может не совпадать с входным сигналом, вызвавшим его, не только по содержанию, но и по природе. Так, например, устная команда роботу может приводить не только к его устному ответу, но и движению для достижения поставленной цели. В случае такого несовпадения исходным сигналом для $s^*(t + \tau_5)$ может выступать один или несколько других, ранее воспринятых

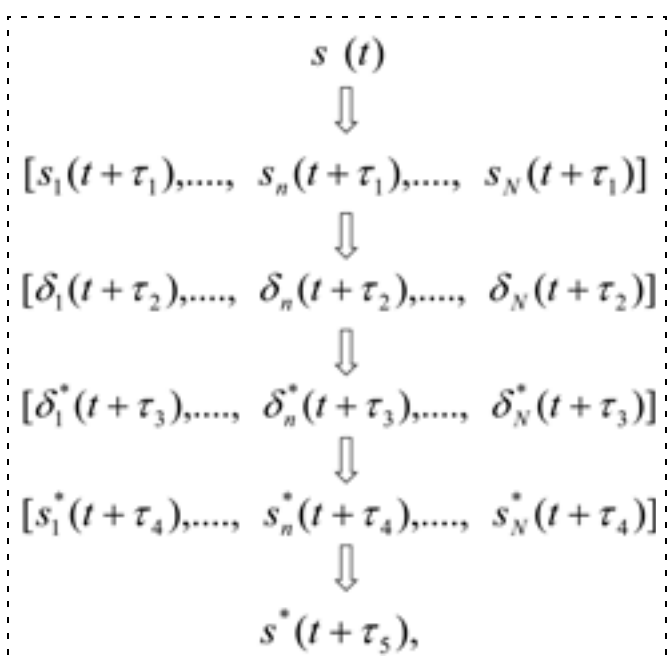


Рис. 3. Схема прямого и обратного преобразования сигналов

АИС, входных сигналов, преобразуемых точно в такую же совокупность последовательностей единичных образов, как и $[s_1^*(t + \tau_4), \dots, s_n^*(t + \tau_4), \dots, s_N^*(t + \tau_4)]$. При таком преобразовании устанавливается не только однозначное соответствие между входами и выходами нейронной сети, но и входами и выходами самой АИС.

Алгоритмы преобразования

Рассмотрим эти алгоритмы сначала на примере сигнала без пространственной составляющей. Обозначим время t и будем исходить из того, что все необходимые сдвиги, связанные с задержками τ_1, \dots, τ_5 , учтены.

Алгоритм прямого преобразования предусматривает сначала разложение сигнала $s(t)$ в гармонический ряд Фурье:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} s_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(nwt + \varphi_n),$$

где A_n — амплитуда гармоник; nw — частота гармоник, $w = 2\pi/T$; φ_n — фаза гармоник; T — период.

Для того чтобы поставить в соответствие каждой составляющей $s_n(t)$ входного сигнала последовательность единичных импульсов с частотой $F_n(t)$ следования как функцией от A_n , требуется знать средние мощности $\overline{s_n^2(t)}$ этих составляющих: $\overline{s_n^2(t)} = A_n^2/2$. Зная $\overline{s_n^2(t)}$ и пороговую энергию W_0 , при которой происходит возбуждение первичных модельных нейронов в датчиках, а также длительность τ_n формируемых импульсов и время $\tau_{нв}$ невосприимчивости этих нейронов после возбуждения, для расчета частоты $F_n(t)$ можно воспользоваться формулами

$$F_n(t) = \frac{1}{\tau_{n_3}(t) + \tau_n + \tau_{нв}}, \quad (1)$$

$$\tau_{n_3}(t) = W_0 / \overline{s_n^2(t)}. \quad (2)$$

Для определения текущих фаз для каждой последовательности единичных импульсов из совокупности $[\delta_1(t), \dots, \delta_n(t), \dots, \delta_N(t)]$ перейдем от φ_n к временным задержкам: $\tau_n = \varphi_n / nw$. С учетом $\tau_{n_3}(t)$ суммарная текущая задержка $\tau_{n_\Sigma}(t)$ единичных импульсов для каждой n -й последовательности равна $\tau_{n_\Sigma}(t) = \tau_n + \tau_{n_3}(t)$.

Таким образом, на любой момент времени последовательностям единичных образов $[\delta_1(t), \dots, \delta_n(t), \dots, \delta_N(t)]$ на выходе датчиков АИС могут быть

поставлены в соответствие следующие характеристики:

- частоты составляющих входного сигнала, порядковые номера которых совпадают с номерами последовательностей единичных образов;
- частоты $F_n(t)$ следования единичных образов, несущие информацию об амплитудах A_n ;
- временные задержки $\tau_{n_\Sigma}(t)$ единичных образов, связанные однозначно с фазами φ_n .

При таком прямом преобразовании сигналов независимо от их природы и структуры на выходе датчиков (см. рис. 1) имеем последовательные совокупности единичных образов, несущие всю входную информацию.

Для воспроизведения этих сигналов в соответствии со схемой на рис. 3 необходимо осуществлять обратное преобразование по другому алгоритму.

Для выполнения такого преобразования для каждой последовательности единичных образов из совокупности $[\delta_1^*(t), \dots, \delta_n^*(t), \dots, \delta_N^*(t)]$ на выходном поле выходного слоя нейронной сети требуется определить частоту $F_n^*(t)$ следования единичных образов и относительную их задержку $\tau_{n_\Sigma}^*(t)$.

Для нахождения частоты $F_n^*(t)$ достаточно определять число $m_n(t)$ импульсов, попадающих в заданный интервал времени T_3 : $F_n^*(t) = m_n(t)/T_3$. В целях установления значений $\tau_{n_\Sigma}(t)$ можно измерять относительные задержки единичных образов в последовательностях $[\delta_1^*(t), \dots, \delta_n^*(t), \dots, \delta_N^*(t)]$. По значениям $F_n^*(t)$, $\tau_{\text{и}}$ и $\tau_{\text{нв}}$ с использованием формул (1), (2) находим средние мощности $s_n^{*2}(t)$ для составляющих воспроизводимого исходного сигнала, а затем их амплитуды:

$$A_n^* = \sqrt{2s_n^{*2}(t)}.$$

При условии, что между нейронами входного и выходного полей слоев сети установлены однозначные соответствия, по их номерам можно определить исходные частоты n^*w этих составляющих. Фазы φ_n^* рассчитываются как

$$\varphi_n^* = \left(\tau_{n_\Sigma}^*(t) - \frac{W_0}{s_n^{*2}(t)} \right) n^*w.$$

Таким образом, все параметры исходного сигнала $s^*(t)$ определены, и он может быть успешно воспроизведен с применением современных методов цифрового синтеза.

Обобщим полученные результаты на случай преобразования структурно-сложных сигналов с пространственными составляющими, например, оптических сигналов, воспринимаемых зрительной системой робота. Такие сигналы для успешной обработки в нейронной сети также должны быть разложены на составляющие. При этом каждой пространственной составляющей должна быть поставлена в соответствие своя группа частотных составляющих (например, соответствующих красному, зеленому и синему цветам). После такого разложения прямое и обратное преобразование этих составляющих может осуществляться аналогично ранее рассмотренному случаю. В интересах обеспечения независимости от возможного перемещения, ротации и масштабирования наблюдаемых структурно-сложных динамических образов при начальной обработке возможно использование управляемых линз или известных правил преобразования сигнала к инвариантному виду [4].

Результаты моделирования и практические рекомендации

Для проверки результативности такого подхода к преобразованию сигналов в АИС осуществлялось моделирование с применением пакета прикладных программ MatLab. В качестве нейронной сети использовали рекуррентную сеть со структурой, приведенной на рис. 2. В сети изначально устанавливалось однозначное соответствие между первым полем нейронов входного-выходного слоя и его третьим полем с задержкой на два цикла функционирования. Аналогично в качестве выходных использовались и другие, более удаленные поля, включая последнее, в том числе второго слоя нейронов. Число нейронов в каждом слое сети равнялось 625.

В соответствии с изложенными алгоритмами моделировали сначала прямое преобразование сигналов. Затем на вход программной модели нейронной сети с разными периодами подавали совокупности единичных образов, несущие информацию о входном сигнале заданной продолжительности от 8 до 24 тактов. В качестве таких совокупностей выступали образы букв, цифр и простых фигур. Пример вводимых в АИС непрерывных сигналов, привязанных к условным тактам функционирования нейронной сети, приведен на рис. 4, а, результат их прямого преобразования — на рис. 4, б. Результат на рис. 4, б представлен в виде последовательности совокупностей единичных образов. Относительно пространственно-частотных составляющих ее можно рассматривать как совокупность последовательностей единичных образов.

Заметим, что первый образ "1" (рис. 4, б, такт 3) вызван сигналом, поступившим в АИС позже сигнала, которому соответствует второй образ "1". Однако после задержек сигналов при формировании

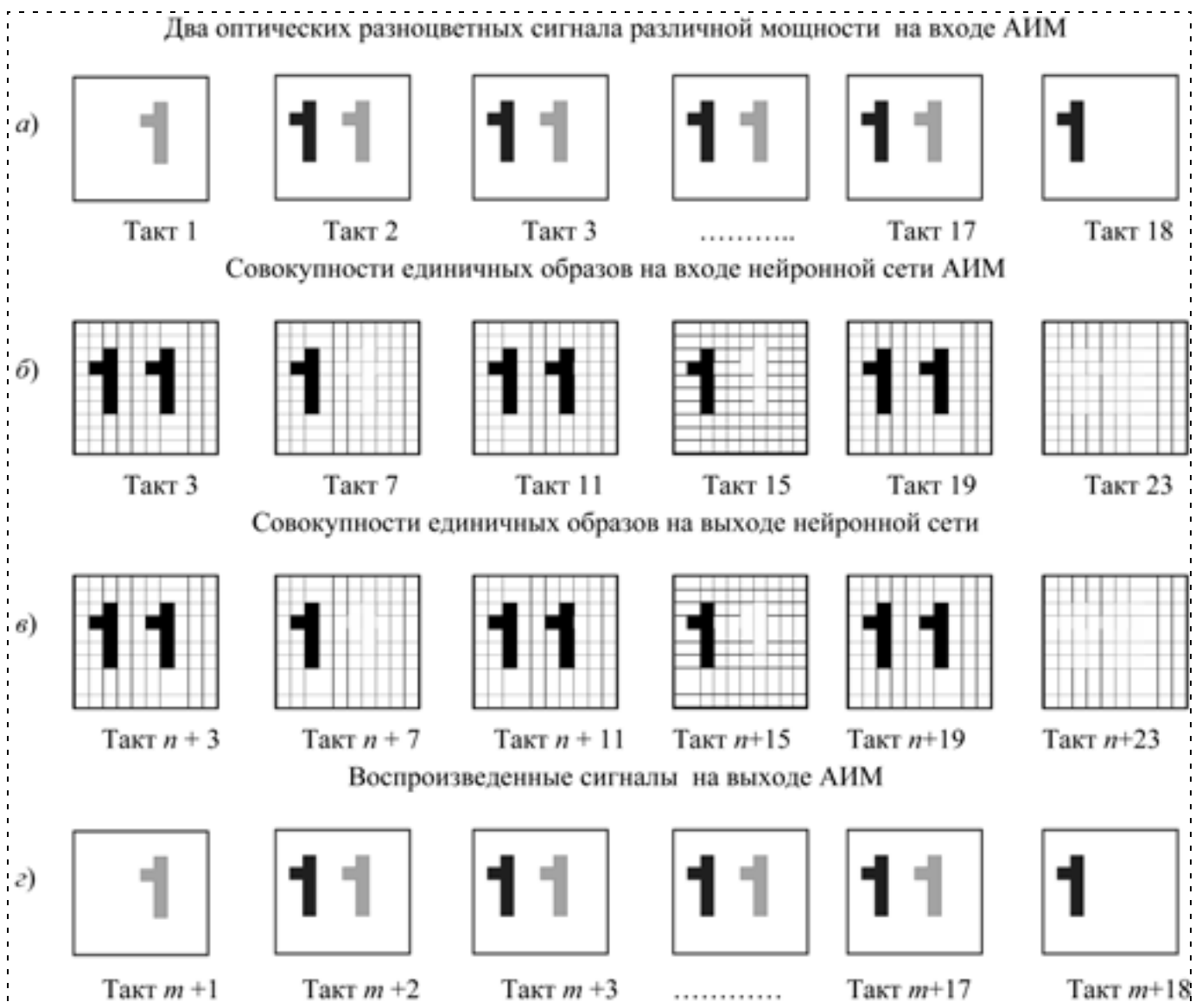


Рис. 4. Примеры результатов преобразования

последовательностей единичных образов начальные фазы сравнялись.

Моделировали обратное преобразование последовательностей единичных образов на выходе третьего поля выходного слоя (рис. 4, в) в исходные сигналы. Пример такого преобразования показан на рис. 4, г.

Результаты моделирования показали, что после прямого преобразования сигналов пространственная, частотная, амплитудная и фазовая структуры сигналов в использованной нейронной сети не разрушаются. Сигнал запоминается в оперативной памяти сети через состояния ее нейронов и в долговременной памяти на синапсах. Было установлено, что запомненные сигналы могут быть успешно вызваны из памяти сети другими связанными с ними сигналами и воспроизведены с высокой точностью в исходном виде путем реализации правил обратного преобразования. В качестве воспроизво-

димых АИС воздействий могут выступать самые различные сигналы, воспринятые системой.

В практическом плане предложенный подход может быть использован при программной и аппаратной реализации АИС. Он применим для АИС на основе не только рекуррентных сетей, но и сетей прямого распространения. Несомненно, рекуррентные сети позволяют реализовать полноценное ассоциативное мышление и поведение АИС. Применение его с нейронными сетями прямого распространения также дает преимущества перед известными решениями по качеству оперативного очищения структурно-сложных сигналов от помех и распознавания этих сигналов.

Выводы

Предложенный подход к прямому и обратному преобразованию сигналов в АИС позволяет расширить их функциональные возможности по обработке информации и взаимодействию с внешним миром.

Предложенные алгоритмы преобразования сигналов развивают взгляды на закономерности, проявляющиеся при обработке информации в нейронных сетях.

Для преобразования сигналов в АИС могут быть использованы нейронные сети с управляемыми сдвигами совокупностей единичных образов вдоль слоев.

Подход может найти применение при разработке перспективных ассоциативных интеллектуальных систем.

Список литературы

1. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Кадочников М. В. Алгоритмы управления движени-

ем многозвенных мехатронно-модульных роботов с адаптивной кинематической структурой // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 3. С. 2—9.

2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.

3. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей. Кн. 1: Учебное пособие для вузов / Общая ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2000. 416 с.

4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с английского И. Д. Рудницкого. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.

5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1103 с.

6. Карпов В. Э., Вальцев В. Б. Динамическое планирование поведения робота на основе сети "интеллектуальных" нейронов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2.

УДК 681.518.5:004.4:004.8

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф.,

Я. О. Покровский, аспирант,

Московский государственный университет

приборостроения и информатики

filimon_ab@mail.ru

Электронная паспортизация в системах интеллектуального управления техническим состоянием промышленного оборудования

Обсуждаются перспективы применения систем электронного документооборота в промышленных системах технического обслуживания и ремонта, возможности применения онтологического инжиниринга в области электронной паспортизации технологического оборудования, принципы интеллектуализации процессов управления техническим состоянием промышленного оборудования.

Ключевые слова: управление техническим состоянием, технологическое оборудование, электронная паспортизация, онтологический инжиниринг

Для современного промышленного производства характерны большое конструктивное и технологическое разнообразие единиц оборудования. В процессе эксплуатации ухудшается его техническое состояние. Физическое старение, неполадки, неисправности и аварии оборудования приводят к простоям производственных цепочек, к снижению качества продукции и увеличению брака, что в итоге воплощается в значительные экономические убытки.

Управление техническим состоянием оборудования

Для успешного осуществления производственной деятельности промышленных предприятий

наряду с собственно производственными процессами необходима также организация ремонтного хозяйства и реализация на его основе управления техническим состоянием собственного парка оборудования.

Назначение ремонтного хозяйства заключается в своевременном и в полном объеме удовлетворении потребностей производственных подразделений предприятия в *техническом обслуживании и ремонте* (ТОР).

Техническое обслуживание — комплекс работ по поддержанию работоспособности или исправности оборудования. *Ремонт* — комплекс мероприятий по восстановлению утерянной или нарушенной работоспособности оборудования путем замены и (или) восстановления его отдельных частей.

Применяют два подхода к планированию объемов и объемов работ по ТОР: планово-предупредительный ремонт (ППР) и ремонт по техническому состоянию. Основанием для первого подхода является наработка (продолжительность работы) оборудования, а для второго — фактическое состояние оборудования и предполагаемые изменения его состояния в процессе эксплуатации.

Ремонт по техническому состоянию является *упреждающим*, основан на оперативных данных и прогнозировании возможности дальнейшей эксплуатации оборудования, дает наибольший экономический эффект и наивысшую степень эксплуатационной готовности оборудования.

Техническое состояние промышленного оборудования — совокупность подверженных изменению в процессе эксплуатации свойств данного оборудования. Оно описывается техническими параметрами оборудования, характеризующими возможное отклонение его функционирования от нормы.

Процесс управления техническим состоянием парка оборудования складывается из следующей последовательности функций (см. рисунок):

- **Мониторинг.** Осуществляется оперативный контроль и оценка технического состояния оборудования.
- **Диагностика.** Обеспечивается обнаружение и идентификация неисправностей и дефектов, прогнозирование технического состояния оборудования, анализ причин поломок и аварий и т. п.
- **Учет и анализ.** Выполняется регистрация, учет и анализ сведений о составе и состоянии всего парка оборудования, простоях оборудования, результатах диагностирования, сроках и объемах выполненных ремонтных работ и др.
- **Планирование.** Осуществляется планирование работ по ТОР на основе диагностической информации и формируются план-графики ремонтов.
- **Управление работами.** Ведутся наряды на работы ремонтной службы, осуществляется координация и контроль выполнения работ.

Компьютеризация данных функций, а также оптимизация и контроль процессов ТОР осуществляется посредством автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтами (АСУ ТОР).

Российские АСУ ТОР находятся в самом начале своего развития [1]. На западе такие системы носят название CMMS (Computerized Maintenance Management Systems — компьютерные системы управления ТОР). Их дальнейшим развитием являются системы EAM (Enterprise Asset Management — управление основными фондами предприятия). Сегодня системы класса CMMS/EAM стали самостоятельным направлением в IT-индустрии [2].

Электронная паспортизация оборудования

Серьезная проблема современных крупных промышленных предприятий — огромное количество бумажной документации и низкая эффективность ручной работы с ней. Решение данной проблемы состоит во внедрении электронной системы документооборота (СЭД) на основе использования компьютерных сетей [3]. Современные СЭД включают централизованное хранилище (архив) документов. Они обеспечивают компьютерную поддержку всех этапов жизненного цикла документа, осуществляют эффективное управление документопотоками и повышают уровень информационной безопасности предприятия.

Основные перспективы развития СЭД связаны с созданием единого информационного пространства. В наше время лучшим решением является использование Web-технологий и XML. Пользователи имеют доступ к хранилищу документов и системе документооборота через Internet/Intranet сети.



Контур управления техническим состоянием

Работа с документами осуществляется через Web-интерфейс.

При внедрении СЭД на промышленном предприятии возникает необходимость ее интеграции с АСУ, CAD/CAM/PDM-системами и другими компонентами автоматизации. Перевод конструкторской, технической и технологической документации в электронный вид и создание электронного архива стали необходимыми условиями информационной поддержки работы предприятия.

Центральное место в информационном обеспечении АСУ ТОР занимает электронная база данных оборудования предприятия. Для каждой единицы оборудования создается *электронный паспорт* оборудования.

В паспорте оборудования фиксируются данные, характеризующие данную единицу техники. Паспорт содержит идентификационный номер, описание объекта, а также чертежи, схемы, документы и любую другую необходимую информацию по нему. Он отражает место данного оборудования в производственной структуре предприятия, его состояние, учет наработки, историю ремонтов и перемещений в течение всего жизненного цикла. Паспорт также содержит информацию о всех узлах и деталях данной единицы оборудования, план-графиках ремонтных работ, затратах на его обслуживание и эксплуатацию.

Электронная паспортизация является важнейшим функционалом АСУ ТОР. Создание подробной электронной базы данных оборудования предприятия позволяет обеспечивать эффективное планирование ремонтных мероприятий, технического и сервисного обслуживания парка оборудования.

Интеллектуализация функций АСУ ТОР

В АСУ современного высокотехнологичного и наукоемкого производства высока доля интеллектуальных задач, машинное решение которых невозможно без применения методов и технологий искусственного интеллекта (ИИ).

В АСУ ТОР к такого рода задачам относятся диагностический мониторинг оборудования, принятие диагностических решений, анализ технического состояния оборудования, учет движения основного технологического оборудования, электронная паспортизация, ведение баз данных по регистрируемым отказам и дефектам, учет и планирование работ по техобслуживанию и ремонту оборудования, анализ эксплуатационных параметров оборудования и др.

Термин "интеллект" (intelligence) означает ум, рассудок, разум, мыслительные способности человека. Соответственно под искусственным интеллектом (Artificial Intelligence) понимается свойство вычислительных систем брать на себя отдельные функции интеллекта человека.

Цель "сильного ИИ" — создание умных машин, копирующих разумное поведение человека. На нее были ориентированы ранние разработки в области ИИ. Однако в настоящее время большее промышленное применение находят приложения "слабого ИИ". Последний объединяет методы и технологии, направленные на решение отдельных интеллектуальных задач — элементы ИИ могут добавляться в существующие системы, придавая им "разумные" свойства.

К интеллектуальным относят задачи, для которых априори неизвестен алгоритм решения, и он должен генерироваться в процессе функционирования системы посредством механизмов адаптации, самообучения или самоорганизации. Задачи такого рода человек способен решать, не располагая никаким априорным алгоритмом. В частности, к данному классу задач относят плохо формализуемые задачи, отличающиеся неполнотой, неоднозначностью и/или противоречивостью исходных данных и знаний о предметной области.

Конкурентоспособность крупных компаний сегодня все в большей степени зависит от знаний, накопленных специалистами компании [4]. К ключевым идеям, влияющим сегодня на развитие производственных систем, следует отнести концепцию управления знаниями (Knowledge Management), направленного на поддержку процессов создания, распространения, обработки и использования знаний внутри предприятия. Важнейшую роль в системах управления знаниями (СУЗ) играют онтологии [5], позволяющие компьютеризировать обработку информации на семантическом уровне. Информационные контуры СУЗ создаются на базе инфраструктуры СЭД.

Онтология — формализованное представление предметной области, включающее словарь терми-

нов для представления и обмена знаниями об этой области и множество связей, установленных между терминами в этом словаре.

Онтологический инжиниринг — это процесс проектирования и разработки онтологий [6]. Его развитие во многом определяется достижениями в области технологий Semantic Web (семантической паутины) — надстройки над WWW (Всемирной паутиной), ориентированной на машинную обработку Web-контента. Онтологии играют ключевую роль в архитектуре Semantic Web.

Онтологический инжиниринг, являясь ядром СУЗ, позволяет реализовывать в АСУ ТОР семантическую обработку электронных документов.

Технологии Business Intelligence

АСУ ТОР является составной частью интегрированной АСУ предприятия. В связи с этим информационно-аналитические задачи АСУ ТОР целесообразно рассматривать в ракурсе Business Intelligence (бизнес-аналитики) — инструментов, используемых для преобразования, хранения, анализа, моделирования, доставки и трассировки информации в ходе работы над задачами, связанными с принятием решений на основе фактических данных. Основными частями Business Intelligence являются технологии OLAP и Data Mining [7].

OLAP (On-Line Analyzing Processing) — оперативная аналитическая обработка данных, "грубый" разведочный анализ. Назначение OLAP-систем — поддержка обработки произвольных ad-hoc (по месту, по мере текущей необходимости) запросов пользователей-аналитиков. В основе OLAP лежит предложенное Э. Ф. Коддом (1993 г.) понятие гиперкуба данных.

Data Mining ("добыча данных") — интеллектуальный анализ данных, направленный на автоматическое извлечение скрытых знаний (Hidden Knowledge) в статистических данных, накопленных в хранилищах данных (Data Warehousing). Data Mining является альтернативой традиционному подходу в инженерии знаний, ориентированному на извлечение знаний из памяти эксперта.

Список литературы

1. Антоненко И., Матюшин В. Особенности внедрения информационных систем управления ТОиР // Техническое обслуживание и ремонт. 2010. №1. С. 45—49.
2. <http://www.itpedia.ru/index.php/CMMS>.
3. Глинских А. Мировой рынок систем электронного документооборота // Jet Info. 2002. № 8 (111).
4. Kühn O., Abecker A. Corporate Memories for Knowledge Management in Industrial Practice: Prospects and Challenges, 1998.
5. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000.
6. Гладун А. Я., Рогушина Ю. В. Онтологии в корпоративных системах // Корпоративные системы. 2006. № 1. С. 41—56.
7. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холлод И. И. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 384 с.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 681.51:004.3

Ю. Н. Хижняков, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Южаков, д-р техн. наук, проф.,
Пермский государственный
технический университет
uz@at.pstu.ac.ru

Управление параллельной работой синхронных генераторов с квазиастатическими внешними характеристиками в полярной системе координат

Рассмотрен метод квазиастатических характеристик управления параллельной работой бесщеточных синхронных генераторов в автономном режиме. Разработаны варианты структурных схем и алгоритмы управления. Достоинством метода является применение "сильного" регулирования, обеспечивающего жесткое поддержание напряжения и частоты, а также равномерное распределение реактивной и активной мощности между бесщеточными синхронными генераторами, статизм внешних характеристик которых составляет 1...2 %.

Ключевые слова: бесщеточный синхронный генератор, блок динамического приоритета, вывигатель, датчики модуля полного тока статора, датчики модуля активного тока статора, блок пороговых элементов, полярная система координат, алгоритм управления

Введение

В настоящее время разными фирмами выпускаются блочно-контейнерные газотурбинные электростанции (ГТЭС). Разработанные ГТЭС мощностью 2,4...63 МВт применяются для электроснабжения потребителей районов, где отсутствуют линии электропередач высокого напряжения, либо экономически целесообразно дополнительно устанавливать ГТЭС. ГТЭС содержит в себе несколько бесщеточных синхронных генераторов (БЩСГ) с воздушным охлаждением, которые приводятся во вращение газотурбинными установками на базе авиационных двигателей. БЩСГ является преобразователем механической энергии, вырабатываемой авиационным двигателем, в электрическую энергию. Мощность авиационного двигателя при-

мерно равна мощности БЩСГ. Общими требованиями к ГТЭС являются параллельная работа нескольких БЩСГ на нагрузку в автономном режиме и с участием сети бесконечной мощности при выполнении всех требований по качеству вырабатываемой электроэнергии согласно ГОСТ 13109—97.

Традиционно управление параллельной работой синхронных генераторов малой и средней мощности выполняется по методу статических характеристик (МСХ) [1]. По МСХ статизм внешних характеристик БЩСГ должен быть не менее 6 %. Провалы напряжения при включении нагрузки определяются свойствами регуляторов напряжения и частоты, что не всегда является приемлемым.

Особенность параллельной работы синхронных генераторов как объекта управления

Производство электроэнергии автономной электроэнергетической системой, состоящей из нескольких энергоустановок, имеет свои особенности, а именно:

- замена мощной энергоустановки несколькими энергоустановками малой мощности снижает себестоимость вырабатываемой электроэнергии и исключает обесточивание во время аварии;
- качество вырабатываемой электроэнергии параллельно работающих энергоустановок зависит от жесткости их внешних характеристик;
- участие разных (равных) по мощности энергоустановок при статизме внешних характеристик не ниже 6 % осуществляется автоматически и не требует дополнительной коррекции;
- снижение статизма внешних характеристик энергоустановок ниже 6 % вызывает противоречие между точностью поддержания напряжения/частоты и точностью распределения реактивной/активной мощности, что требует разработки новых методов управления параллельной работой синхронных генераторов автономной электростанции;
- снижение длины линий электропередач повышает быстродействие электромагнитных переходных процессов между генераторами.

С учетом особенностей объекта предлагаются варианты метода управления параллельной работой БЩСГ с внешними (квазиастатическими) характеристиками, статизм которых не более 2 %, в полярной системе координат (ПСК).

Структурные решения устройств управления параллельной работой БЩСГ с квазиэстатическими внешними характеристиками

Особенностью управления параллельной работой БЩСГ в ПСК по методу квазиэстатических характеристик (МКАХ) по первому варианту является сравнение векторов полного тока статоров БЩСГ через сравнение интервалов времени Δt , пропорциональных фазовым сдвигам между токами и напряжением одноименной фазы статоров БЩСГ, и релейно-логическое сравнение модулей полных токов.

Известно, что напряжение фазы "а" на шинах генераторов изменяется по закону $u_a = U_{ma} \sin \omega t$, а ток в фазе "а" $i_a = I_{ma} \sin(\omega t - \varphi)$. В момент прохождения тока i_a через нуль имеем

$$i_a(\Delta t) = I_{ma} \sin(\omega \Delta t - \varphi) = 0; \quad (1)$$

$$(\omega \Delta t - \varphi) = 0 \text{ или } \varphi = \omega \Delta t,$$

т. е. фазовый сдвиг φ между напряжением и током пропорционален временному интервалу Δt между моментами времени перехода кривых напряжения u_a и тока i_a через нуль.

Очевидно также, что активная и реактивная мощности фазы генератора определяются по формулам [4]

$$P = UI \cos \varphi; \quad (2)$$

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Тогда угол сдвига между вектором напряжения и вектором тока одноименной фазы первого генератора определяется по формуле

$$\varphi_1 = \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}, \quad (3)$$

где I_{a1} , I_{p1} — активная и реактивная составляющие тока, соответственно, первого генератора; I_1 — модуль полного тока первого генератора.

Подставив (3) в (1), получим временной интервал Δt_1 :

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \frac{1}{\omega_1} \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что чем больше активная мощность генератора, тем меньше Δt и наоборот, а также чем больше реактивная мощность генератора, тем больше Δt и наоборот.

Если ввести в рассмотрение параллельно работающий второй генератор, то для него, аналогично, можно записать:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega_2} \arccos \frac{I_{a2}}{I_2} = \frac{1}{\omega_2} \arcsin \frac{I_{p2}}{I_2}. \quad (5)$$

Сравнивая интервалы времени Δt_1 и Δt_2 при равных модулях полных токов I_1 и I_2 , можно выявить

генератор с большим или меньшим значением реактивной/активной мощности.

В выражениях (4), (5) функция \arccos берется от относительных активных токов БЩСГ, а функция \arcsin — от относительных реактивных токов БЩСГ, базисными значениями которых являются модули полных токов одноименной фазы. В выражениях (4), (5) принимается

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega = \omega_{\text{зад}},$$

где ω_1 , ω_2 , $\omega_{\text{зад}}$ — угловые скорости вращения магнитного поля первого и второго БЩСГ и заданное значение угловой скорости при работе станции в автономном режиме.

Таким образом, в качестве входных параметров для управления параллельной работой БЩСГ в ПСК с релейной настройкой обосновано применение временного интервала Δt и модуля полного тока БЩСГ.

При параллельной работе БЩСГ на нагрузку, имеющей активно-индуктивный характер, очевидно, что БЩСГ с меньшим временным интервалом имеет минимальный реактивный ток и максимальный активный ток, а БЩСГ с большим временным интервалом имеет максимальный реактивный ток и минимальный активный ток.

Распределение реактивной/активной мощности между генераторами осуществляется ранжированием генераторов по временному интервалу (фазовому сдвигу между векторами тока и напряжения одноименной фазы) с помощью блока динамического приоритета (БДП) [5], реализующего дисциплину обслуживания входов с относительным приоритетом типа "первый пришел — первый обслужен".

Логическое описание БДП:

- у БЩСГ, занимающего первое место в очереди, ток статора первым проходит через нуль после начала положительного полупериода напряжения на шинах;
- у БЩСГ, занимающего последнее место в очереди, ток статора последним проходит через нуль после начала положительного полупериода напряжения на шинах.

Ранжирование параллельно работающих БЩСГ с помощью БДП в каждый положительный полупериод фазного напряжения на шинах с частотой 50 Гц требует блока фиксации первого места в очереди, так как частота регулирования меньше частоты питающего напряжения. Выход блока фиксации первого места в очереди является выходом выявителя V_1 . Выявитель V_1 содержит нуль-орган по напряжению (HO_u), нуль-органы тока (HO_1, \dots, HO_n) по числу БЩСГ, триггеры ($Tr_1 — Tr_n$) по числу БЩСГ и БДП.

Для определения БЩСГ с максимальным модулем полного тока нагрузки через релейное сравнение введен выявитель V_2 с настройкой на максимум, построенный на основании полного графа.

Выявитель B_2 содержит датчики модулей полного тока (ДМПТ₁, ..., ДМПТ_n) по числу БЩСГ, блок пороговых элементов (БПЭ) и дешифратор (ДШ). Математическое описание выявителя B_2 представлено в виде системы логических уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1 &= P_{1-2} \wedge P_{1-3} \wedge \dots \wedge P_{1-i} \wedge \dots \wedge P_{1-j} \wedge \dots \wedge P_{1-n}; \\ \tilde{V}_2 &= \bar{P}_{2-1} \wedge \bar{P}_{2-3} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_i &= \bar{P}_{i-1} \wedge \bar{P}_{i-2} \wedge \dots \wedge P_{i(i-1)} \wedge \dots \wedge P_{i-j} \wedge \dots \wedge P_{i-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_j &= \bar{P}_{j-1} \wedge \bar{P}_{j-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-(j-1)} \wedge \dots \wedge P_{j-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \tilde{V}_n &= \bar{P}_{n-1} \wedge \bar{P}_{n-2} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-j} \wedge \dots \\ &\wedge \bar{P}_{n-(n-1)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_n$ — выходы выявителя B_2 с настройкой на максимум; n — число генераторов ГТЭС; $P_{1-2}, \dots, P_{i-j}, \dots, P_{n-(n-1)}$ — прямые пороговые функции модулей полного тока БЩСГ; $\bar{P}_{1-2}, \dots, \bar{P}_{i-j}, \dots, \bar{P}_{n-(n-1)}$ — инверсные пороговые функции модулей полного тока БЩСГ.

Число z релейных элементов БПЭ определяется по формуле

$$z = 0,5(n - 1). \quad (7)$$

Для управления параллельной работой БЩСГ по МКАХ в ПСК необходимо ввести логический блок для формирования отдельно канала поддержания напряжения и распределения реактивной мощности между БЩСГ и канала поддержания частоты и распределения активной мощности между БЩСГ.

На рис. 1 приведена структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по МКАХ в ПСК по первому варианту.

Рассмотрим управление параллельной работой БЩСГ в ПСК по МКАХ по второму варианту.

Из выражения активной P_1 и реактивной Q_1 мощностей следует, что изменение их зависит от изменения угла сдвига фаз φ между векторами напряжения и тока одноименной фазы первого генератора.

Из (2) следует

$$\varphi_1 = \arctg \frac{I_{p1}}{I_{a1}}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (1), получим

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arctg \frac{I_{p1}}{I_{a1}}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что чем больше реактивный ток генератора, тем больше Δt и наоборот. Если ввести в рассмотрение параллельно работающий второй генератор, то для него, аналогично, можно записать:

$$\Delta t_2 = \frac{1}{\omega_2} \arctg \frac{I_{p2}}{I_{a2}}. \quad (10)$$

Сравнивая интервалы времени Δt_1 и Δt_2 при равных активных токах I_{a1} и I_{a2} , можно выявить генератор с большим или меньшим значением реактивного тока. В выражениях (9), (10) функция \arctg берется от относительных реактивных токов БЩСГ, где базисными значениями являются активные токи одноименной фазы генераторов. В выражениях (9), (10) принимается

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega = \omega_{ш} = \omega_{зад}.$$

Таким образом, в качестве входных параметров для управления параллельной работой БЩСГ в

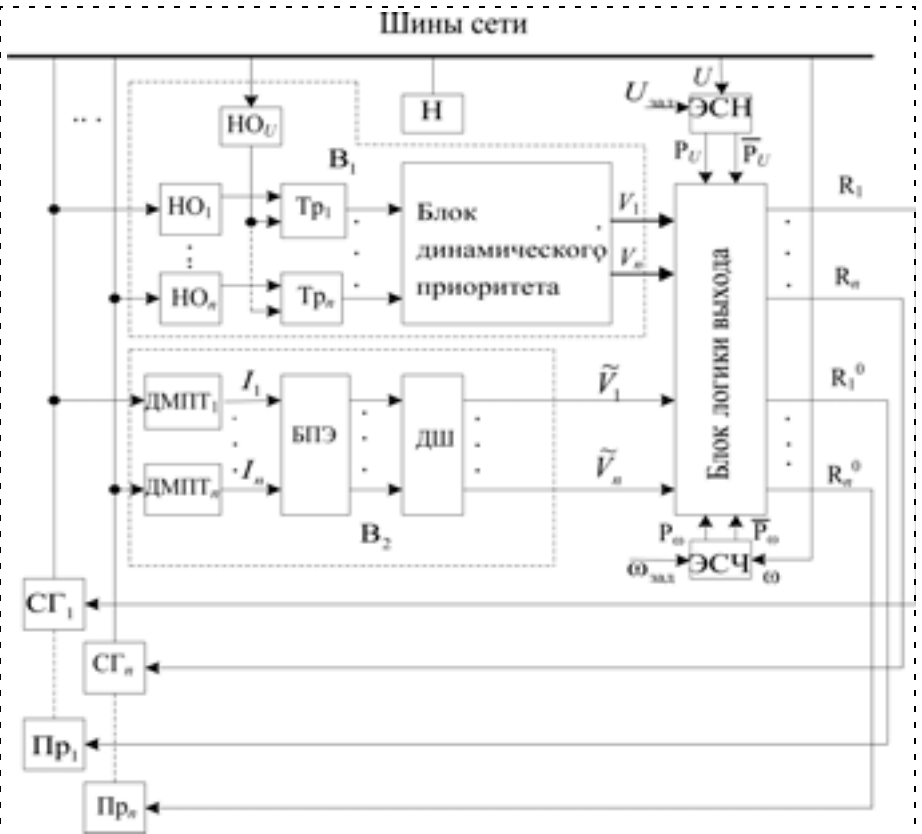


Рис. 1. Структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по МКАХ в ПСК: НО_u — нуль-орган по напряжению; НО₁, ..., НО_n — нуль-органы тока; БПЭ — блок пороговых элементов; ДШ — дешифратор; ЭСЧ — пороговый элемент сравнения по напряжению; ЭСЧ — пороговый элемент сравнения по частоте; СГ_i — *i*-й БЩСГ; Пр_i — *i*-й привод; Тр₁, ..., Тр_n — RS-триггеры; ДМПТ₁, ..., ДМПТ_n — датчики модулей полного тока

ПСК с релейной настройкой обосновано применение временного интервала Δt и активного тока БЩСГ. Распределение реактивного тока между БЩСГ осуществляется БДП.

Для релейно-логического сравнения активных токов генераторов вводится выявитель V_3 , построенный на основании полного графа. Выявитель V_3 имеет в своем составе датчики активного тока (ДАТ₁, ..., ДАТ_n) по числу БЩСГ, блок пороговых элементов (БПР) и дешифратор (ДШ) с математическим описанием в виде системы логических уравнений

$$\left. \begin{aligned} \hat{V}_1 &= P_{1-2}^0 \wedge P_{1-3}^0 \wedge \dots \wedge P_{i-1}^0 \wedge \dots \wedge P_{1-j}^0 \wedge \dots \\ &\wedge P_{1-n}^0; \\ \hat{V}_2 &= \bar{P}_{2-1} \wedge \bar{P}_{2-3} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-i} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-j} \wedge \dots \wedge \bar{P}_{2-n}; \\ &\dots \dots \dots \\ \hat{V}_i &= \bar{P}_{i-1}^0 \wedge \bar{P}_{i-2}^0 \wedge \dots \wedge \bar{P}_{i(i-1)}^0 \wedge \dots \wedge \bar{P}_{i-j}^0 \wedge \dots \\ &\wedge P_{i-n}^0; \\ &\dots \dots \dots \\ \hat{V}_j &= \bar{P}_{j-1}^0 \wedge \bar{P}_{j-2}^0 \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-i}^0 \wedge \dots \wedge \bar{P}_{j-(j-1)}^0 \wedge \dots \\ &\wedge P_{j-n}^0; \\ &\dots \dots \dots \\ \hat{V}_n &= \bar{P}_{n-1}^0 \wedge \bar{P}_{n-2}^0 \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-i}^0 \wedge \dots \wedge \bar{P}_{n-j}^0 \wedge \dots \\ &\wedge \bar{P}_{n-(n-1)}^0, \end{aligned} \right\} (11)$$

где $\hat{V}_1, \hat{V}_2, \dots, \hat{V}_n$ — выходы выявителя V_3 с настройкой на максимум; n — число генераторов ГТЭС; $P_{1-2}^0, \dots, P_{i-j}^0, \dots, P_{n-(n-1)}^0$ — прямые пороговые функции активного тока БЩСГ; $\bar{P}_{1-2}^0, \dots,$

$\bar{P}_{i-j}^0, \dots, \bar{P}_{n-(n-1)}^0$ — инверсные пороговые функции активных токов БЩСГ. Число пороговых элементов БПЭ определяется по формуле (7). Особенностью второго варианта управления параллельной работой БЩСГ в ПСК по МКАХ является замена выявителя V_2 на выявитель V_3 в структурной схеме, показанной на рис. 2.

Алгоритмы управления устройств управления параллельной работой БЩСГ с квазиэстатическими внешними характеристиками

Логические уравнения блока логики выхода устройства управления по каналу поддержания на-

пряжения и распределения реактивной мощности по первому варианту следующие:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= V_1 \wedge \bar{P}_U; \\ R_2 &= V_2 \wedge \bar{P}_U; \\ &\dots \dots \dots \\ R_n &= V_n \wedge \bar{P}_U; \end{aligned} \right\} (12)$$

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_2 = \dots = \bar{R}_n = P_U;$$

$$P_U = \begin{cases} 1, & U \leq U_{\text{зад}}; \\ 0, & U_{\text{зад}} \leq U, \end{cases}$$

где V_1, V_2, \dots, V_n — выходы БДП; P_U, \bar{P}_U — прямая и инверсная пороговые функции релейного элемента по напряжению; $R_1, R_2, \dots, R_n, \bar{R}_1, \bar{R}_2, \dots, \bar{R}_n$ — прямые и инверсные выходы, соответственно, блока логики канала поддержания напряжения и распределения реактивной мощности.

Алгоритм блока логики канала поддержания напряжения и распределения реактивной мощности между БЩСГ по первому варианту:

- уменьшить ток возбуждения i -го БЩСГ с максимальным реактивным током статора при напряжении на шинах $U_{\text{зад}} \leq U$;
- увеличить одновременно токи возбуждения БЩСГ при напряжении на шинах $U \leq U_{\text{зад}}$.

Логические уравнения блока логики выхода устройства управления по каналу поддержания частоты и распределения активной мощности по первому варианту следующие:

$$\left. \begin{aligned} R_1^0 &= \tilde{V}_1 \wedge \bar{P}_\omega; \\ R_2^0 &= \tilde{V}_2 \wedge \bar{P}_\omega; \\ &\dots \dots \dots \\ R_n^0 &= \tilde{V}_n \wedge \bar{P}_\omega; \end{aligned} \right\}$$

$$\bar{R}_1^0 = \bar{R}_2^0 = \dots = \bar{R}_n^0 = P_\omega;$$

$$P_\omega = \begin{cases} 1, & \omega \leq \omega_{\text{зад}}; \\ 0, & \omega_{\text{зад}} \leq \omega, \end{cases}$$

где $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \dots, \tilde{V}_n$ — выходы выявителя V_2 ; P_ω, \bar{P}_ω — прямая и инверсная пороговые функции релейного элемента по частоте; $R_1^0, R_2^0, \dots, R_n^0, \bar{R}_1^0, \bar{R}_2^0, \dots, \bar{R}_n^0$ — прямые и инверсные выходы, соответственно, блока логики канала поддержания частоты и распределения активной мощности.

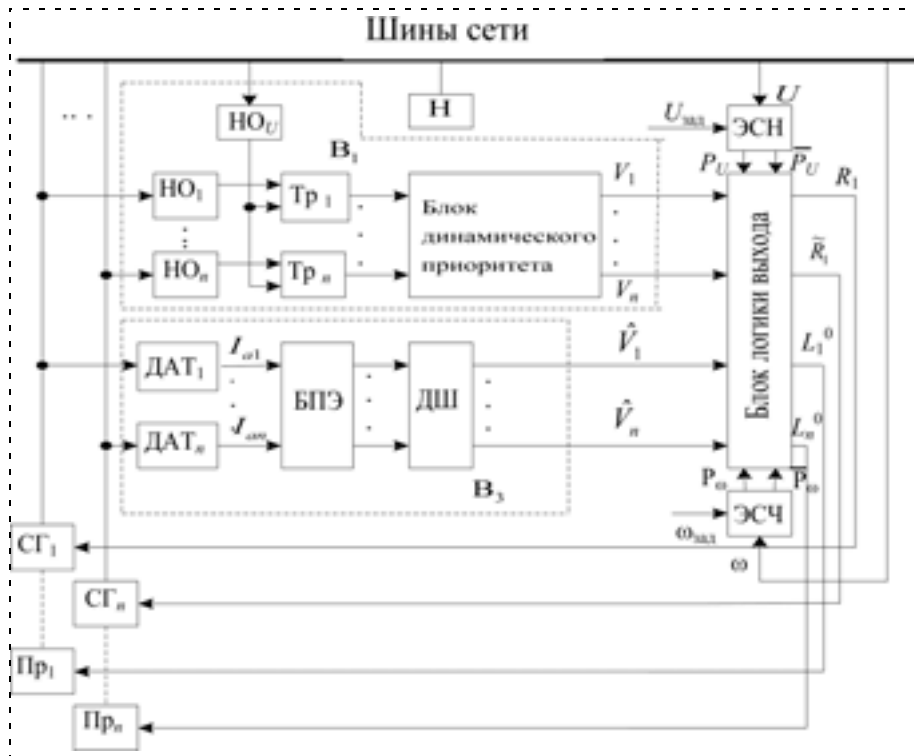


Рис. 2. Структурная схема управления параллельной работой БЩСГ по МКАХ в ПСК: НО_и — нуль-орган по напряжению; НО₁, ..., НО_и — нуль-органы тока; БПЭ — блок пороговых элементов; ДШ — дешифратор; ЭСН — пороговый элемент сравнения по напряжению; ЭСЧ — пороговый элемент сравнения по частоте; СГ_и — *i*-й БЩСГ; Пр_и — *i*-й привод; Тр₁, ..., Тр_и — RS-триггеры; ДАТ₁, ..., ДАТ_и — датчики активного тока

Алгоритм блока логики канала поддержания частоты и распределения активной мощности между БЩСГ по первому варианту следующий:

- уменьшить частоту вращения привода *i*-го БЩСГ с максимальным активным током статора при частоте на шинах $\omega > \omega_{зад}$;
- увеличить одновременно частоту вращения приводов БЩСГ при частоте на шинах $\omega \leq \omega_{зад}$.

Логические уравнения блока логики выхода устройства управления по каналу поддержания напряжения и распределения реактивной мощности по второму варианту соответствуют (11).

Логические уравнения блока логики выхода устройства управления по каналу поддержания частоты и распределения активной мощности по второму варианту следующие:

$$L_1^0 = \hat{V}_1 \wedge \bar{P}_\omega;$$

$$L_2^0 = \hat{V}_2 \wedge \bar{P}_\omega;$$

.....

$$L_n^0 = \hat{V}_n \wedge \bar{P}_\omega;$$

$$\bar{L}_1^0 = \bar{L}_2^0 = \dots = \bar{L}_n^0 = P_\omega;$$

$$P_\omega = \begin{cases} 1, & \omega \leq \omega_{зад}; \\ 0, & \omega_{зад} \leq \omega, \end{cases}$$

где $\hat{V}_1, \hat{V}_2, \dots, \hat{V}_n$ — выходы вы-
явителя В₃; P_ω, \bar{P}_ω — прямая и
инверсная пороговые функции
релейного элемента по частоте;
 $L_1^0, L_2^0, \dots, L_n^0, \bar{L}_1^0, \bar{L}_2^0, \dots, \bar{L}_n^0$ —
прямые и инверсные выходы,
соответственно, блока логики
канала поддержания частоты и
распределения активной мощ-
ности.

Алгоритм блока логики кана-
ла поддержания частоты и рас-
пределения активной мощности
между БЩСГ по второму вари-
анту:

- уменьшить частоту вращения привода *i*-го БЩСГ с макси-
мальным активным током
статора при частоте на шинах
 $\omega > \omega_{зад}$;
- увеличить одновременно част-
тоту вращения приводов
БЩСГ при частоте на шинах
 $\omega \leq \omega_{зад}$.

Блоки логики выхода (рис. 1,
2) при разных вариантах, принима-
емая изменения входных сигнала-
лов, формируют переключающие функции на из-
менение тока возбуждения *k*-го БЩСГ и измене-
ние подачи топлива привода *i*-го БЩСГ.

Проведенное моделирование подтвердило воз-
можность управления БЩСГ в ГТЭС по МКАХ в
ПСК с заданной точностью.

Заключение

1. Управление по методу квазиастатических ха-
рактеристик параллельной работой бесщеточных
синхронных генераторов обеспечивает мгновен-
ную реакцию при включении асинхронной нагруз-
ки, что повышает статическую и динамическую ус-
тойчивость в работе, исключает уравнильные
провода для выравнивания напряжения возбуди-
телей генераторов и является альтернативным реше-
нием по отношению к методу статических ха-
рактеристик, широко применяемого на современных
электростанциях.

2. Разработаны варианты структурных схем
управления параллельной работой генераторов
по методу квазиастатических характеристик в
полярной системе координат в автономном ре-
жиме.

3. Созданы алгоритмы управления параллель-
ной работой генераторов по методу квазиастатиче-
ских характеристик в полярной системе координат
в автономном режиме.

Список литературы

1. Москалев А. Г. Автоматическое регулирование режима энергетической системы по частоте и активной мощности. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 240 с.
2. Хижняков Ю. Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. Пермь: Изд. Перм. гос. техн. ун-та, 1999. 114 с.
3. Дудкин Ю. П., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Метод квазиэстатических характеристик параллельной работы газогенераторных установок // 5 Международная конференция "Авиация и космонавтика — 2006". Тез. докл. (23—26 октября 2006 г.), Москва. С. 372.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. / Учеб. для студентов энергетических и электротехнических вузов. М.: Высш. школа, 1973. 752 с.
5. Кон Е. Л., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Авторское свидетельство № 1670687 "Устройство динамического приоритета". Опубл. в Б. И. 30, 1991.

УДК 621.313.2.072.2

А. В. Кривилев, канд. техн. наук, доц.,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)
alexkrivilev@gmail.com

Математическое описание цифровой системы управления мехатронного модуля привода с трехфазным вентильным двигателем

Математически описана цифровая система управления мехатронного модуля привода с трехфазным вентильным двигателем, позволяющая реализовать произвольный метод коммутации ключевыми элементами импульсного усилителя мощности с различными типами и длительностью широтно-импульсного сигнала.

Ключевые слова: математическая модель, цифровая система управления, вентильный двигатель, мехатронный модуль, управляющие булевы функции, логические переменные, метод коммутации

Введение

Одной из наиболее широко используемых в настоящее время структур цифрового следящего привода (ЦСП) [1] является структура с мехатронным модулем (ММ), изображенная на рис. 1, где ЦУМ — цифровая управляющая машина; СМВ — специализированный микропроцессорный вычислитель; ЦСУ — цифровая система управления; ВД — вентильный двигатель; ИУМ — импульсный усилитель мощности с шестью ключевыми элементами (КЭ); СД — трехфазный синхронный двигатель; МП — механическая передача; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; K_B — входной код управления (КУ); K_Y — КУ после вычисления ошибки рассогласования и коррекции; K_C — код сигнала обратной связи; УБФ — управляющие булевы функции; φ_C — угол поворота выходного вала и Ω_C — скорость вращения выходного вала.

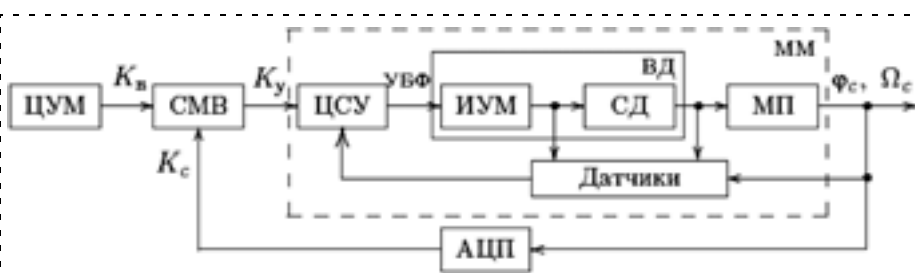


Рис. 1. Цифровой следящий привод с ММ

ЦСУ, входящая в состав ММ, служит для приема входных сигналов, сигналов обратной связи и формирования УБФ, поступающих на соответствующие КЭ согласно определенному методу коммутации и выбранному способу управления КЭ. Реализация большого диапазона частот вращения ротора ВД на основе широтно-импульсного сигнала (ШИС) порядка десятков килогерц, формирование паузы при включении КЭ для их защиты от сквозных токов и необходимость как можно меньшего по времени цикла обработки сигналов обратной связи приводят к достаточно высоким требованиям к быстродействию ЦСУ. Если ЦСУ имеет недостаточное быстродействие, то увеличиваются потери энергии в ВД.

В настоящее время цифровые устройства управления трехфазными ВД базируются на специализированных цифровых сигнальных процессорах или высокопроизводительных микроконтроллерах, включающих в себя дополнительные периферийные устройства для связи с ИУМ, датчиками обратной связи и системой управления верхнего уровня. Примерами таких микросхем служат устройства TMS320C2000 фирмы Texas Instruments Inc. [2] и dsPIC33F фирмы Microchip Technology Inc [3]. Несмотря на высокопроизводительные вычислительные ядра и развитые периферийные устройства, их структура является жесткой, не допускающей изменения или включения дополнительного модуля расширения для увеличения как быстродействия самого устройства, так и числа управляемых им объектов. В целях увеличения быстродействия работы устройства и реализации параллельных алгоритмов управления необходимо перейти на микросхемы программируемой логики,

позволяющие реализовывать на одном кристалле произвольное число как вычислительных микропроцессорных ядер, так и соответствующих периферийных устройств. Начальным этапом перехода к высокопроизводительным параллельным цифровым устройствам мехатронного модуля привода является создание математической модели ЦСУ с последующей ее реализацией на языках описания цифровой аппаратуры VHDL или VERILOG.

Структура ЦСУ

Структура разработанной ЦСУ приведена на рис. 2, где БЗКП — блок загрузки кода длительности паузы; БЗКР — блок загрузки кода разрядности; БЗКУ — блок загрузки кода управления; БЗКЧ — блок загрузки кода частоты; БПЗКУ — блок преобразования загруженного кода управления; БПЗКР — блок преобразования загруженного кода разрядности; БПЗКЧ — блок преобразования загруженного кода частоты; БПЗКП — блок преобразования загруженного кода длительности паузы; БФЛП — блок формирования логических переменных; БФУБФ — блок формирования управляющих булевых функций; БПСПр — блок приема сигналов положения ротора; ГИ — генератор импульсов; CLK — тактовый сигнал; $H_{1,2,3}$ — сигналы положения ротора; E_{LD} — сигнал разрешения загрузки внешних данных; C_{CTRL} — сигнал КУ; C_{DGT} — сигнал кода разрядности КУ; C_{FRQ} — сигнал кода частоты прохождения тактового сигнала; C_{DT} — сигнал кода длительности паузы; LC_{CTRL} — загруженный КУ; LC_{DGT} — загруженный код разрядности КУ; LC_{FRQ} — загруженный код частоты прохождения тактового сигнала; LC_{DT} — загруженный код длительности паузы; E_{REC} — сигнал разрешения записи загруженных данных; SG — знак внутреннего КУ; ABS — абсолютная величина внутреннего КУ; M_{PWSCNT} — модуль счета счетчика блока формирования периода ШИС; M_{FRQCNT} — модуль счета счетчика делителя частоты (ДЧ); M_{DTCNT} — модуль

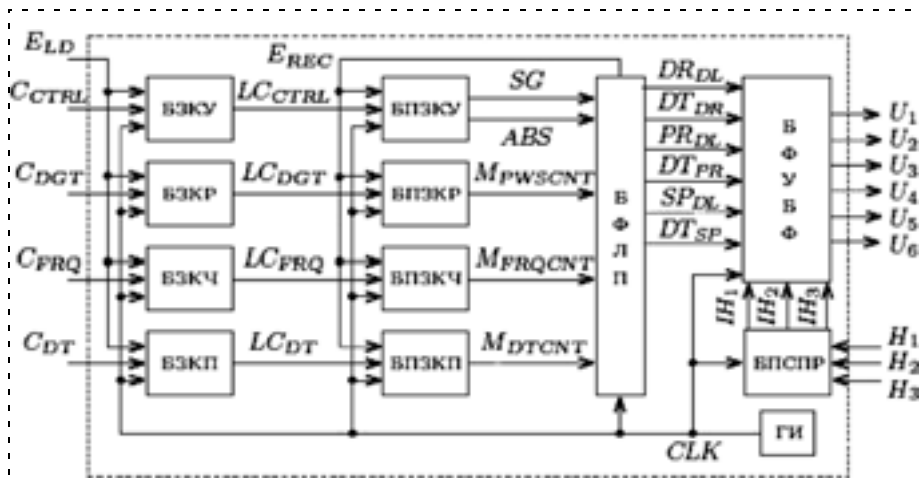


Рис. 2. Структура ЦСУ ММ

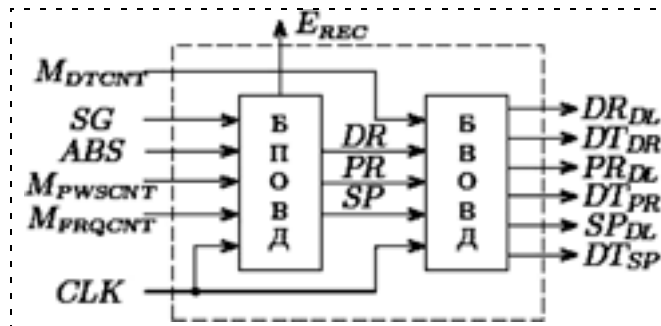


Рис. 3. Структура БФЛП

счета счетчика блока формирования сигналов паузы; $IH_{1,2,3}$ — внутренние сигналы положения ротора; DR_{DL} — сигнал направления вращения с учетом паузы; SP_{DL} — сигнал скорости вращения с учетом паузы; PR_{DL} — сигнал равномерной загрузки КЭ с учетом паузы; DT_{DR} , DT_{SP} и DT_{PR} — сигналы паузы; $U_{1, 2, \dots, 6}$ — УБФ.

Структура ЦСУ является иерархической. БФЛП состоит из последовательно соединенных блоков первичной (БПОВД) и вторичной (БВОВД) обработки внутренних данных (рис. 3).

Конвейерную обработку данных в ЦСУ можно разделить на пять этапов:

- 1) загрузка поступающих на вход цифровых сигналов;
- 2) преобразование загруженных данных;
- 3) формирование необходимого набора логических переменных;
- 4) прием сигналов положения ротора трехфазного двигателя;
- 5) формирование УБФ.

Продолжительность этапа формирования логических переменных значительно превышает остальные этапы обработки данных в ЦСУ. Таким образом, длительность именно этого этапа определяет время преобразования входных сигналов в соответствующие им выходные сигналы. Время преобразования зависит от момента загрузки внешних данных относительно текущего момента выполнения

этапа формирования логических переменных и лежит в диапазоне от одного до двух периодов ШИС.

При таком рассмотрении ЦСУ необходимо определить и математически описать все возможные состояния входа, внутренние состояния и состояния выхода, а также условия переходов между соответствующими состояниями ЦСУ.

Входные сигналы

Входные сигналы ЦСУ разделяются на две группы. К первой группе относятся сигналы,

которые поступают на вход ММ, а ко второй группе — сигналы обратной связи, определяющие текущее положение ротора двигателя. Сигналы первой и второй групп образуют a -мерный вектор v , который характеризует состояние входа ЦСУ. Совокупность всех возможных состояний вектора v образует множество $N_0 = \{v_0, v_1, \dots, v_{2^n-1}\}$, где n —

общее число разрядов всех входных сигналов. Так как для управления скоростью и направлением вращения ротора могут использоваться не все элементы вектора v , то при разработке ЦСУ следует рассматривать подмножество N ($N \subset N_0$).

Входными сигналами в ЦСУ ММ с трехфазным ВД служат:

- КУ (C_{CTRL} — Control Code);
- код текущей разрядности КУ (C_{DGT} — Digit Code);
- код частоты прохождения тактового сигнала из генератора импульсов (ГИ) (C_{FRQ} — Frequency Code);
- код длительности паузы при включении КЭ (C_{DT} — Deal Time Code);
- сигнал разрешения загрузки входных данных (E_{LD} — Enable Load).

Информация о желаемой скорости и необходимом направлении вращения ротора ВД располагается в C_{CTRL} , который может быть передан в ЦСУ в виде прямого, обратного или дополнительного двоичного кода.

Сигнал C_{DGT} несет информацию о текущей разрядности КУ, т. е. информацию о числе значащих битов мантиссы C_{CTRL} , которые используются для задания необходимой скорости вращения ротора ВД.

Номер поступающего из ГИ тактового сигнала, по переднему фронту которого происходит обновление внутреннего состояния ЦСУ, содержится в сигнале C_{FRQ} .

Значение цифрового сигнала C_{DT} определяет длительность паузы при включении соответствующего КЭ.

Сигнал E_{LD} предназначен для разрешения или запрещения загрузки в ЦСУ значений рассмотренных выше входных кодов.

Сигналы C_{CTRL} , C_{DGT} , C_{FRQ} , C_{DT} и E_{LD} являются элементами вектора v_i , представляющего собой состояние входа ЦСУ, во время работы которой возможны любые комбинации значений этих сигналов.

Определение текущего положения ротора ВД реализуется с помощью трех цифровых датчиков Холла, выходные сигналы которых служат входами в ЦСУ.

В зависимости от размещения датчиков Холла друг относительно друга и числа пар полюсов индуктора существуют два варианта выходных значе-

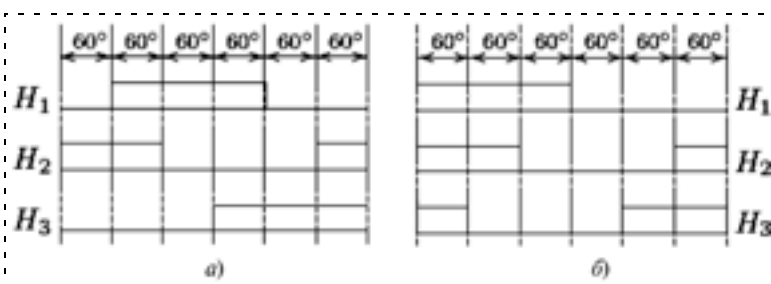


Рис. 4. Последовательности сигналов с цифровых датчиков Холла

ний датчиков. Первый вариант (рис. 4, а) характеризуется сдвигом выходного значения следующего датчика относительно предыдущего на 120° электрических, а второй вариант (рис. 4, б) — на 60° электрических.

В случае использования первого варианта выходных значений датчиков Холла существуют две повторяющиеся последовательности их значений при вращении ротора в разные стороны: $H_1 H_2 H_3: 010 \Leftrightarrow 110 \Leftrightarrow 100 \Leftrightarrow 101 \Leftrightarrow 001 \Leftrightarrow 011 \Leftrightarrow 010$, где H_1 , H_2 и H_3 — выходы первого, второго и третьего датчиков. Математическое описание первого варианта имеет вид

$$F_{120} = \overline{H_1} H_2 \vee H_1 \overline{H_3} \vee \overline{H_2} H_3.$$

При использовании второго варианта также будут иметь место две повторяющиеся последовательности, соответствующие обоим направлениям вращения ротора ВД, $H_1 H_2 H_3: 111 \Leftrightarrow 110 \Leftrightarrow 100 \Leftrightarrow 000 \Leftrightarrow 001 \Leftrightarrow 011 \Leftrightarrow 111$. Математическое выражение, описывающее второй вариант последовательностей значений датчиков Холла, имеет вид

$$F_{60} = \overline{H_1} \overline{H_2} \vee H_1 \overline{H_3} \vee H_2 H_3.$$

Значения датчиков Холла описываются следующей системой:

$$H_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \cos(\Phi p - \alpha i) > 0; \\ 1, & \text{если } \cos(\Phi p - \alpha i) \leq 0, \end{cases}$$

где i — номер датчика; Φ — угол поворота ротора двигателя; α — угол значений датчиков Холла друг относительно друга; p — число пар полюсов.

Сигналы H_1 , H_2 и H_3 являются элементами вектора v , представляющего собой состояние входа ЦСУ. Во время работы системы управления будет присутствовать лишь часть (шесть из восьми) комбинаций значений сигналов H_1 , H_2 и H_3 .

С учетом вышеизложенного вектор v , являющийся состоянием входа ЦСУ, будет иметь следующий вид:

$$v = (H_1, H_2, H_3, E_{LD}, C_{CTRL1}, C_{CTRL2}, \dots, C_{CTRLk}, C_{DGT1}, C_{DGT2}, \dots, C_{DGTl}, C_{FRQ1}, C_{FRQ2}, \dots, C_{FRQm}, C_{DT1}, C_{DT2}, \dots, C_{DTn}),$$

где k, l, m, n обозначают число разрядов соответствующих сигналов на входе ЦСУ.

При работе ЦСУ ММ используются не все возможные комбинации значений элементов вектора v_i , т. е. число комбинаций меньше, чем $2^{k+l+m+n+4}$.

Внутренние сигналы

Внутреннее состояние ЦСУ описывается вектором $\mu_j = (e_{Q_1}, \dots, e_{Q_r}, \dots, e_{Q_b})$, где $e_{Q_r} = 0$ или 1 — значение выходного сигнала элемента памяти Q_r , $j = e_{Q_b}, \dots, e_{Q_2}, e_{Q_1}$. Следовательно, множество состояний ЦСУ M_0 состоит из 2^b элементов $M_0 = \{\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{2^b-2}, \mu_{2^b-1}\}$.

Так при управлении скоростью и направлением вращения используются не все элементы множества M_0 , то при проектировании ЦСУ следует рассматривать подмножество M ($M \subset M_0$).

Блоки загрузки входных данных

Загрузка и хранение данных в ЦСУ осуществляется с помощью БЗКУ, БЗКР, БЗКЧ и БЗКП, выходные сигналы которых описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} LC_{CTRL}^+ = C_{CTRL}E_{LD}d\overline{CLK} \vee LC_{CTRL}\overline{E_{LD}d\overline{CLK}}; \\ LC_{DGT}^+ = C_{DGT}E_{LD}d\overline{CLK} \vee LC_{DGT}\overline{E_{LD}d\overline{CLK}}; \\ LC_{FRQ}^+ = C_{FRQ}E_{LD}d\overline{CLK} \vee LC_{FRQ}\overline{E_{LD}d\overline{CLK}}; \\ LC_{DT}^+ = C_{DT}E_{LD}d\overline{CLK} \vee LC_{DT}\overline{E_{LD}d\overline{CLK}}, \end{cases} \quad (1)$$

где LC_{CTRL} , LC_{DGT} , LC_{FRQ} и LC_{DT} — текущие загруженные цифровые сигналы КУ, кода разрядности КУ, кода частоты прохождения тактового сигнала, кода продолжительности паузы на включение КЭ соответственно; LC_{CTRL}^+ , LC_{DGT}^+ , LC_{FRQ}^+ и LC_{DT}^+ — следующие значения соответствующих загруженных цифровых данных; $d\overline{CLK}$ — передний фронт тактового сигнала [4].

Система (1) справедлива при выполнении следующего уравнения, которое накладывает ограничение на одновременное изменение любого из сигналов C_{CTRL} , C_{DGT} , C_{FRQ} и C_{DT} и поступление переднего фронта CLK :

$$(\nabla C_{CTRL} \vee \nabla C_{DGT} \vee \nabla C_{FRQ} \vee \nabla C_{DT})d\overline{CLK} = 0. \quad (2)$$

Здесь и далее символ ∇ используется для обозначения произвольного изменения значения следующего за ним информационного сигнала.

Блок преобразования загруженного кода управления

БПЗКУ предназначен для выделения из LC_{CTRL} знака (SG) и абсолютного значения (ABS) КУ, а также их хранения в течение одного периода ШИС. В том случае, если в C_{CTRL} используется прямой цифровой код, то для определения SG и ABS действительна система

$$\begin{cases} SG^+ = LC_{CTRLn}E_{REC}d\overline{CLK} \vee SG\overline{E_{REC}d\overline{CLK}}; \\ ABS_i^+ = LC_{CTRLi}E_{REC}d\overline{CLK} \vee ABS_i\overline{E_{REC}d\overline{CLK}}. \end{cases} \quad (3)$$

В противном случае следует рассматривать систему уравнений

$$\begin{cases} SG^+ = LC_{CTRLn}E_{REC}d\overline{CLK} \vee SG\overline{E_{REC}d\overline{CLK}}; \\ ABS_i^+ = (LC_{CTRLi} \oplus LC_{CTRLn})E_{REC}d\overline{CLK} \vee \\ \vee ABS_i\overline{E_{REC}d\overline{CLK}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $i = 0, \dots, n-1$ — номер разряда внутреннего и загруженного КУ; LC_{CTRLn} — старший разряд загруженного КУ; ABS_i , ABS_i^+ — текущее и следующее значения соответствующего разряда абсолютного значения внутреннего кода соответственно; SG , SG^+ — текущее и следующее значения знака внутреннего КУ соответственно.

Система уравнений (3) справедлива при выполнении уравнения (5), ограничивающего изменение загруженного КУ синхронно с передним фронтом CLK , система (4) — при выполнении условия (6), исключающего одновременное изменение LC_{CTRL} с учетом транспортной задержки (t_{CL}) при прохождении через комбинационную часть БПЗКУ и CLK с нуля на единицу:

$$\nabla LC_{CTRLi}d\overline{CLK} = 0; \quad (5)$$

$$(t_{CL} + \nabla LC_{CTRLi})d\overline{CLK} = 0. \quad (6)$$

Блок преобразования загруженного кода разрядности

БПЗКР служит для преобразования значения LC_{DGT} в модуль счета счетчика блока формирования периода ШИС M_{PWSCNT} и его хранения в течение периода ШИС. Каждому значению LC_{DGT} ставится в соответствие одно значение M_{PWSCNT} . Например, $LC_{DGT} = 000 \rightarrow M_{PWSCNT} = 000000011110$, ..., $LC_{DGT} = 111 \rightarrow M_{PWSCNT} = 11111111110$.

Значение M_{PWSCNT} служит для определения значимого диапазона изменения абсолютного значения внутреннего КУ.

Использование БЗКР и БПЗКР позволяет сократить габаритные размеры печатной платы и выдать микросхему с меньшим числом выводов.

Блок преобразования загруженного кода частоты

БПЗКЧ обеспечивает преобразование LC_{FRQ} в модуль счета счетчика ДЧ M_{FRQCNT} и его хранения в течение периода ШИС.

Преобразование загруженного кода частоты выполняется с помощью суммирования LC_{FRQ} с некоторым пороговым значением частоты T_{FRQ} (*Frequency Threshold*), определяющим максимально возможную частоту прохождения тактового сигнала. Значение T_{FRQ} должно быть значительно больше, чем максимально возможное значение LC_{FRQ} . Такое соотношение между T_{FRQ} и LC_{FRQ} дает возможность регулировать длительность паузы при включении КЭ без значительного влияния на результирующую скважность ШИС. Таким образом, математическое описание M_{FRQCNT} имеет следующий вид:

$$M_{FRQCNT}^+ = (LC_{FRQ} + T_{FRQ})E_{REC}d\overline{CLK} \vee \vee M_{FRQCNT}E_{REC}d\overline{CLK}, \quad (7)$$

где M_{FRQCNT} и M_{FRQCNT}^+ — соответственно текущее и следующее значения модуля счета счетчика ДЧ.

Выражение (7) имеет место при выполнении уравнения (8):

$$(t_{CL} + \nabla LC_{FRQ_i})d\overline{CLK} = 0, \quad (8)$$

где $i = 0, \dots, n$ — номер разряда загруженного кода частоты прохождения тактового сигнала CLK .

Блок преобразования загруженного кода паузы

БПЗКП преобразует LC_{DT} в модуль счета M_{DTCNT} счетчика длительности паузы и хранит его в течение периода ШИС до поступления следующего разрешающего значения E_{REC} .

Выходное значение блока описывается следующей формулой:

$$M_{DTCNT}^+ = LC_{DT}E_{REC}d\overline{CLK} \vee \vee M_{DTCNT}E_{REC}d\overline{CLK}, \quad (9)$$

где M_{DTCNT} и M_{DTCNT}^+ — текущее и следующее значения модуля счета счетчика длительности паузы при включении КЭ.

Выражение (9) является справедливым при выполнении условия

$$\nabla LC_{DT_i}d\overline{CLK} = 0. \quad (10)$$

Блок первичной обработки данных

БПОВД на основе SG , ABS , M_{PWSCNT} , M_{FRQCNT} и CLK формирует DR , SP , PR и E_{REC} . БПОВД состоит из ДЧ, блока формирования сигнала направ-

ления вращения (БФСНВ), блока формирования периода ШИС (БФПШИС), блока формирования сигнала скорости вращения (БФССВ), блока формирования сигнала равномерной загрузки КЭ (БФСРЗКЭ) и блока формирования сигнала разрешения записи и преобразования загруженных данных (БФСРЗЗД).

ДЧ служит для уменьшения частоты следования тактовых импульсов в целях уменьшения быстродействия работы БПОВД по отношению к БВОВД. Таким образом, задачей ДЧ является выделение каждого n -го импульса, поступающего из ГИ.

Сигнал разрешения работы E_{WORK} представляет собой выходной сигнал ДЧ и описывается следующим образом:

$$E_{WORK} = \begin{cases} 0, & \text{если } FRC_j \neq 0; \\ 1, & \text{если } FRC_j = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где FRC_j — текущее значение счетчика ДЧ.

Тип ШИС определяет момент на периоде ШИС, относительно которого происходит изменение ширины единичного значения сигнала, а также моменты обновления значений данных, влияющих на скважность. Различают следующие типы ШИС [5]: центрированный с двумя обновлениями данных за период (I) (рис. 5, а), центрированный с одним обновлением данных за период (II) (рис. 5, б), передний фронтальный (III) (рис. 5, в) и задний фронтальный (IV) (рис. 5, г).

Длительность периода ШИС

$$T_{PWS} = T_1 + T_2, \quad (12)$$

где T_1 — продолжительность работы счетчика периода (СПШИС) PWC в режиме вычитания; T_2 — время функционирования СПШИС в режиме суммирования.

Время работы СПШИС в режиме вычитания

$$T_1 = (M_{PWSCNT_1} + 1)(M_{FRQCNT_1} + 1)T_{CLK}, \quad (13)$$

где T_{CLK} — период тактового сигнала CLK ; M_{PWSCNT_1} — модуль счета СПШИС в режиме вычитания; M_{FRQCNT_1} — модуль счета счетчика ДЧ во время работы СПШИС в режиме вычитания.

Продолжительность работы СПШИС в режиме суммирования

$$T_2 = (M_{PWSCNT_2} + 1)(M_{FRQCNT_2} + 1)T_{CLK}, \quad (14)$$

где M_{PWSCNT_2} — модуль счета СПШИС в режиме суммирования; M_{FRQCNT_2} — модуль счета счетчика ДЧ при функционировании СПШИС в режиме суммирования.

Выражение (12) является общим для всех ШИС. При ШИС типа II $T_1 = T_2$. Следовательно, $T_{PWS} = 2T_2 = 2T_1$. Период T_{PWS} будет равен T_2 при типе III и T_1 в случае использования ШИС типа IV.

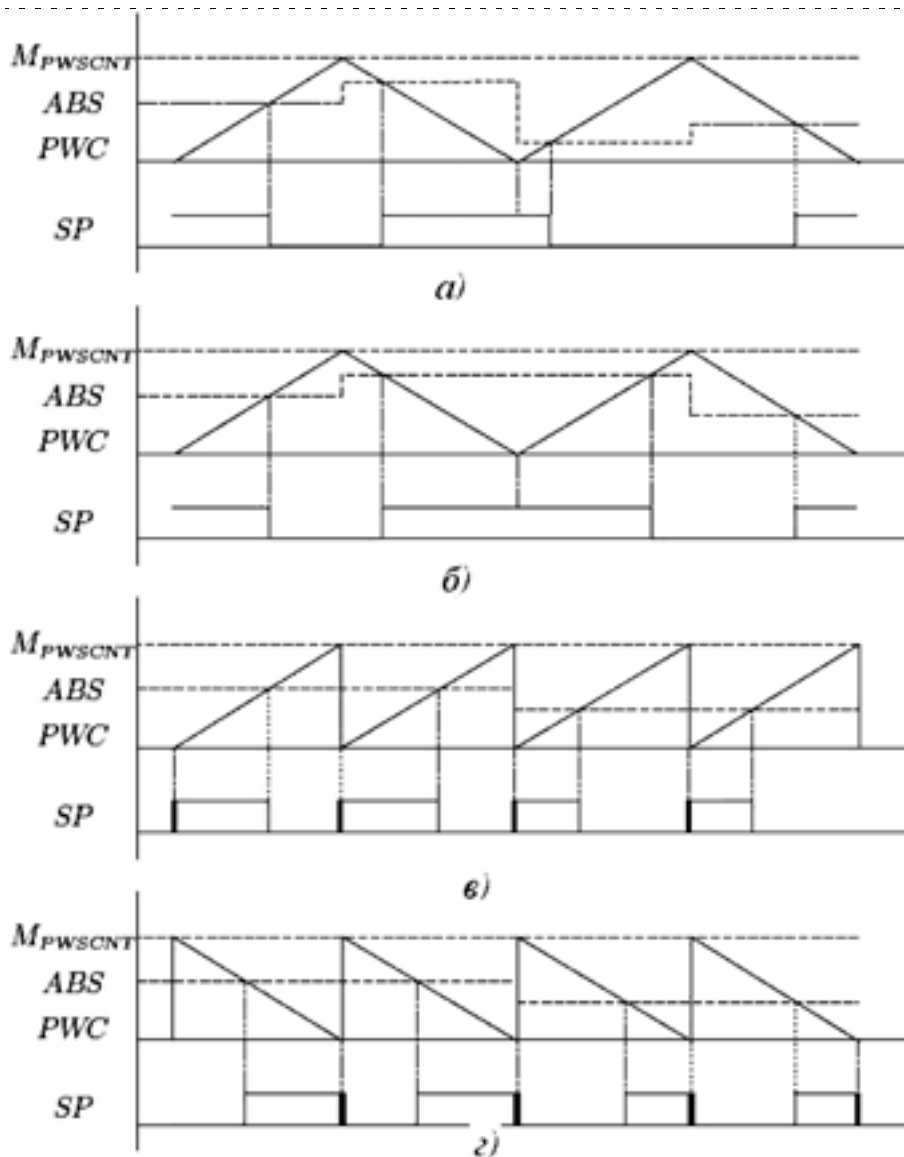


Рис. 5. Типы широтно-импульсного сигнала

Изменение значения M_{FRQCNT} приводит к плавному изменению периода ШИС, а M_{PWSCNT} — к резкому.

Сигнал E_{REC} служит для организации синхронной записи и преобразования загруженных данных. БФСРЗД предназначен для создания сигнала E_{REC} , активный уровень которого характеризует начало нового этапа формирования логических переменных.

Аналитическое выражение сигнала E_{REC} в случае ШИС типов II и III имеет вид

$$E_{REC} = \begin{cases} 1, & \text{если } (PWC_j = M_{PWSCNTk})(FRC_i = 1); \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases} \quad (15)$$

где PWC_j — значение СПШИС; $M_{PWSCNTk}$ — значение модуля счета СПШИС на k -м периоде ШИС; FRC_i — значение счетчика ДЧ.

При использовании заднего фронтального ШИС

$$E_{REC} = \begin{cases} 1, & \text{если } (PWC_j = 0) \wedge \\ & \wedge (FRC_i = 1); \\ 0 & \text{— в противном} \\ & \text{случае.} \end{cases} \quad (16)$$

В случае ШИС типа I применяется математическое описание в виде

$$E_{REC} = \begin{cases} 1, & \text{если} \\ & (PWC_j = M_{PWSCNTk}) \wedge \\ & \wedge (FRC_i = 1) \wedge \\ & \wedge \overline{DIR} \vee \\ & \vee PWC_j = 0) \wedge \\ & \wedge (FRC_i = 1)DIR; \\ 0 & \text{— в противном} \\ & \text{случае.} \end{cases} \quad (17)$$

Выражение (17) представляет собой объединение двух выражений (15) и (16) с использованием сигнала направления счета DIR .

Сигнал DR описывается выражением

$$DR^+ = SGd\overline{CLK} \vee \vee DRd\overline{CLK}, \quad (18)$$

которое справедливо при выполнении уравнения

$$\vee SGd\overline{CLK} = 0. \quad (19)$$

Логическая переменная SP представляет собой ШИС, скважность которого пропорциональна требуемой скорости вращения:

$$SP^+ = Qd\overline{CLK} \vee SPd\overline{CLK}, \quad (20)$$

где

$$Q = \begin{cases} 1, & \text{если } PWC_j < ABS_j; \\ 0, & \text{если } PWC_j \geq ABS_j. \end{cases} \quad (21)$$

Выражения (20) и (21) справедливы для всех четырех типов ШИС и имеют место при выполнении условия

$$\vee Qd\overline{CLK} = 0. \quad (22)$$

Сигнал PR является отличительной особенностью методов симметрично-поочередной, поочередной и поочередно-диагональной коммутаций КЭ [6]. Аналитическое описание PR имеет вид

$$PR^+ = (PR \oplus Y)d\overline{CLK} \vee PRd\overline{CLK}, \quad (23)$$

где

$$Y = \begin{cases} 1, \text{ если } E_{WORKDIR}(PWC_j = M_{PWSCNTk}) \wedge \\ \wedge (ABS_i > 0) \vee (Z_{ABS_{i-1}} \oplus (ABS_i = 0)); \\ 0 - \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

i — порядковый номер цикла формирования ЛП; $Z_{ABS_{i-1}}$ — сигнал сравнения ABS с нулевым значением на предыдущем цикле формирования переменных.

Формула (23) имеет место при выполнении уравнения

$$\nabla Y d\overline{CLK} = 0. \quad (24)$$

Блок вторичной обработки данных

В состав БВОВД входят блок задержки сигналов (БЗС) и блок формирования сигналов паузы (БФСП). БЗС введен для задержки сигналов DR , SP и PR в целях их синхронизации с соответствующими сигналами паузы при включении КЭ.

Логические переменные DR , PR и SP с учетом задержки описываются с помощью следующих математических зависимостей:

$$DR_{DL}^+ = DR d\overline{CLK} \vee DR_{DL} d\overline{CLK}; \quad (25)$$

$$PR_{DL}^+ = PR d\overline{CLK} \vee PR_{DL} d\overline{CLK}; \quad (26)$$

$$SP_{DL}^+ = SP d\overline{CLK} \vee SP_{DL} d\overline{CLK}. \quad (27)$$

Выражения (25)—(27) справедливы при выполнении уравнения

$$(\nabla DR \vee \nabla PR \vee \nabla SP) d\overline{CLK} = 0. \quad (28)$$

Сигналы паузы во время включения КЭ позволяют исключить появление в стойках ИУМ сквозных токов в случае использования незащищенных КЭ. Сигналы паузы реализуются с помощью БФСП, принцип работы которого показан на рис. 6. При разных значениях сигналов DR и DR_{DL} (PR и PR_{DL} либо SP и SP_{DL}) становятся активными сигналы разрешения работы счетчика формирования сигналов паузы E_{DL} и загрузки модуля счета в счетчик БФСП LD_{DL} , следствием чего является загрузка M_{DTCNT} в счетчик БФСП и активизация сигнала паузы DT_{DR} (DT_{PR} либо DT_{SP}).

Сигнал загрузки модуля счета в счетчик БФСП имеет вид

$$LD_{DL} = (DR \oplus DR_{DL}) \vee (PR \oplus PR_{DL}) \vee (SP \oplus SP_{DL}).$$

Математическое выражение сигнала разрешения работы счетчика БФСП следующее:

$$E_{DL} = L_{DR} \vee L_{PR} \vee L_{SP},$$

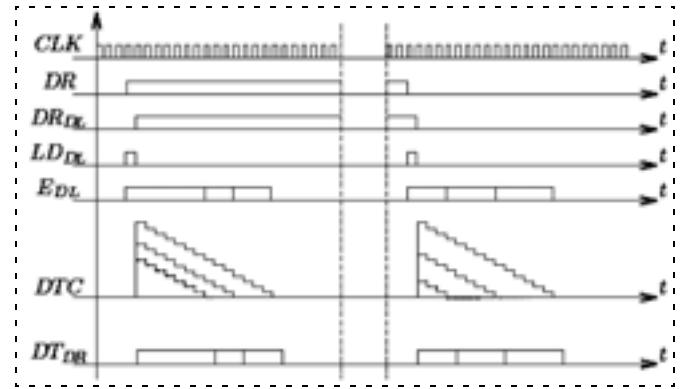


Рис. 6. Временные диаграммы БФСП

$$\text{где } L_{DR} = (DR \oplus DR_{DL}) \vee DT_{DR} \left(\prod_{i=1}^n \overline{DTC_i} \right);$$

$$L_{PR} = (PR \oplus PR_{DL}) \vee DT_{PR} \left(\prod_{i=1}^n \overline{DTC_i} \right);$$

$$L_{SP} = (SP \oplus SP_{DL}) \vee DT_{SP} \left(\prod_{i=1}^n \overline{DTC_i} \right),$$

i — номер разряда счетчика паузы во время включения КЭ.

Сигналы паузы при включении КЭ описываются с помощью следующей системы функций:

$$\begin{cases} DT_{DR}^+ = L_{DR} d\overline{CLK} \vee DT_{DR} d\overline{CLK}; \\ DT_{PR}^+ = L_{PR} d\overline{CLK} \vee DT_{PR} d\overline{CLK}; \\ DT_{SP}^+ = L_{SP} d\overline{CLK} \vee DT_{SP} d\overline{CLK}. \end{cases} \quad (29)$$

Система функций (29) имеет место при выполнении уравнения

$$(\nabla L_{DR} \vee \nabla L_{PR} \vee \nabla L_{SP}) d\overline{CLK} = 0. \quad (30)$$

Блок приема сигналов о положении ротора

БПСР предназначен для приема и хранения сигналов, поступающих с датчика положения ротора. Выходными сигналами блока являются внутренние значения сигналов о положении ротора I_{H1} , I_{H2} и I_{H3} , обновление которых происходит каждый раз при поступлении нового импульса из ГИ. Выходные сигналы БПСР описываются с помощью системы функций

$$IH_i^+ = H_i d\overline{CLK} \vee IH_i d\overline{CLK}, \quad (31)$$

где i — номер датчика Холла.

Система (31) имеет место при выполнении уравнения

$$(\nabla H_1 \vee \nabla H_2 \vee \nabla H_3) d\overline{CLK} = 0. \quad (32)$$

Генератор импульсов

ГИ соединен с каждым блоком, входящим в ЦСУ, и предназначен для синхронизации ее работы. Период тактового сигнала CLK определяется исходя из выполнения условий (5), (6), (8), (10), (19), (22), (24), (28), (30) и (32), исключающих одновременное изменение соответствующих информационных сигналов и поступление переднего фронта тактового сигнала. Период тактового сигнала наряду с M_{PWSCNT} и M_{FRQCNT} определяет период ШИС.

Состояние ЦСУ

Состояние ЦСУ описывается с помощью вектора μ , имеющего с учетом вышеизложенного следующий вид:

$$\mu = (C_{CTRL0}, C_{CTRL1}, \dots, C_{CTRL_{k-1}}, LC_{DGT0}, LC_{DGT1}, \dots, LC_{DGT_{l-1}}, LC_{FRQ0}, LC_{FRQ1}, \dots, LC_{FRQ_{m-1}}, LC_{DT0}, LC_{DT1}, \dots, LC_{DT_{n-1}}, ABS_0, ABS_1, \dots, ABS_{k-2}, SG, M_{FRQCNT0}, M_{FRQCNT1}, \dots, M_{FRQCNT_{q-1}}, M_{PWSCNT0}, M_{PWSCNT1}, \dots,$$

$$M_{PWSCNT_{p-1}}, M_{DTCNT0}, M_{DTCNT1}, \dots, M_{DTCNT_{n-1}}, FRC_0, FRC_1, \dots, FRC_{q-1}, PWC_0, PWC_1, \dots, PWC_{p-1}, E_{REC_{DL}}, DR, PR, SP, DR_{DL}, PR_{DL}, SP_{DL}, DTC_0, DTC_1, \dots, DTC_{n-1}, DT_{DR}, DT_{PR}, DT_{SP}, IH_1, IH_2, IH_3),$$

где k — число разрядов загруженного КУ; l — число разрядов загруженного кода разрядности КУ; m — число разрядов загруженного кода частоты прохождения тактового сигнала; n — число разрядов загруженного кода длительности паузы при включении КЭ, модуля счетчика и самого счетчика БФСР; p — число разрядов модуля счетчика и самого счетчика БФПШИС; q — число разрядов модуля счетчика и самого счетчика ДЧ.

Во время работы ЦСУ используются не все возможные комбинации значений вектора μ .

Выходные сигналы

Выходные сигналы ЦСУ формируются в БФУБФ и подаются на КЭ ИУМ, образуя s -мерный вектор λ , который является состоянием выхо-

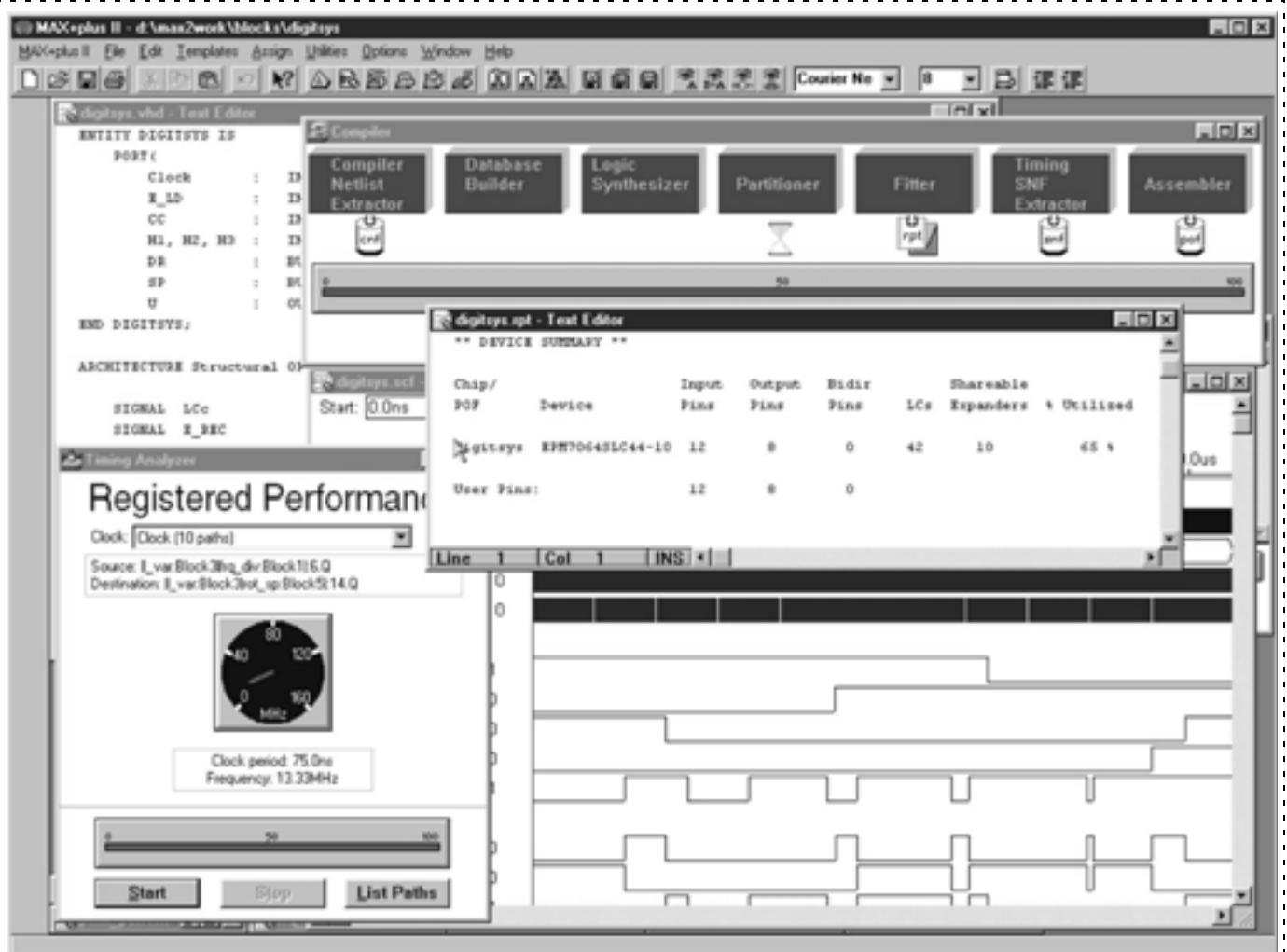


Рис. 7. Результаты моделирования ЦСУ

да системы управления. Совокупность всех возможных состояний вектора λ образует множество $\Lambda_0 = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{2^c-1}\}$. Так как при управлении направлением и скоростью вращения ротора трехфазного ВД используются не все элементы множества Λ_0 , то целесообразно рассматривать подмножество Λ ($\Lambda \subset \Lambda_0$).

Используя предложенный в [6] подход, можно получить математическое описание произвольного метода коммутации КЭ, который определяет все возможные состояния выхода ЦСУ. Например, аналитические выражения УБФ для одной стойки, реализующие метод симметричной коммутации КЭ при их 120-градусном управлении, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= DR_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} IH_1 \overline{IH}_2 \overline{SP}_{DL} \vee \\
 &\vee DR_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} \overline{IH}_1 IH_2 SP_{DL} \vee \\
 &\vee \overline{DR}_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} IH_1 \overline{IH}_2 SP_{DL} \vee \\
 &\vee \overline{DR}_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} \overline{IH}_1 IH_2 \overline{SP}_{DL}; \\
 U_2 &= DR_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} IH_1 \overline{IH}_2 SP_{DL} \vee \\
 &\vee DR_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} \overline{IH}_1 IH_2 \overline{SP}_{DL} \vee \\
 &\vee \overline{DR}_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} IH_1 \overline{IH}_2 \overline{SP}_{DL} \vee \\
 &\vee \overline{DR}_{DL} \overline{DT}_{DR} \overline{DT}_{SP} \overline{IH}_1 IH_2 SP_{DL}.
 \end{aligned}$$

При рассматриваемом методе существуют семь возможных состояний выхода ЦСУ.

Заключение

Разработана структура и предложена математическая модель ЦСУ ММ привода с трехфазным ВД, позволяющая реализовывать быстродействующие параллельные алгоритмы импульсного управления исполнительным двигателем, а также одно-временное управление сразу несколькими двигателями с помощью одной микросхемы на основе

программируемой логики, что приводит к уменьшению потребляемой мощности, габаритных размеров и стоимости системы по сравнению с использованием нескольких микроконтроллеров.

Для обеспечения стабильной работы устройства ЦСУ приведена система уравнений, накладывающая ограничения на скорость изменения внутренних информационных сигналов.

Представлено математическое описание метода симметричной коммутации КЭ с учетом паузы при их включении в случае 120-градусного управления.

Приведенная математическая модель ЦСУ может быть использована при разработке цифровой части привода с применением высокоуровневых языков описания VHDL или VERILOG. На рис. 7 с помощью системы автоматизированного проектирования цифровых устройств MAX + PLUS II представлены: вариант описания ЦСУ на языке VHDL; результаты моделирования в виде временных диаграмм входных, внутренних и выходных сигналов; максимально возможная частота работы (13 МГц) и логическая емкость (42 логические ячейки) при использовании метода симметричной коммутации КЭ при их 120-градусном управлении без учета паузы.

Список литературы

1. Крымов Б. Г., Рабинович Л. В., Стеблецов В. Г. Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами: Учеб. пособие для студентов высших технических учебных заведений. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
2. Motor Control Overview. Next-Generation Embedded Texas Instruments Motor Control from Texas Instruments. TI. SPRB166C, 2004. focus.ti.com/lit/ml/sprb166c/sprb166c.pdf
3. dsPIC33F Product Overview. dsPIC[®] DSC High-Performance 16-Bit Digital Signal Controllers. Microchip. DS70155C. 2005. www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70155c.pdf.
4. Пухальский Г. И., Новосельцева Т. Я. Проектирование дискретных устройств на интегральных микросхемах: Справочник. М.: Радио и связь. 1990. 304 с.
5. Попов Б. Н. Цифровые устройства систем приводов летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. 124 с.
6. Кривилев А. В. Автоматизированный синтез управляющих булевых функций мехатронного модуля привода с трехфазным вентильным двигателем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 2. С. 131–140.

12–14 октября 2010 г. в Санкт-Петербурге состоится

3-я мультиконференция

ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2010)

Состав мультиконференции

- XXVII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов
Н. Н. Острякова
- Научно-техническая конференция "Управление в технических системах"
- 7-я научно-техническая конференция "Мехатроника, автоматизация, управление"
- 6-я научная конференция "Управление и информационные технологии"
- Научно-технический семинар "Управление в распределенных сетевых и мультиагентных системах"

Подробная информация о мультиконференции и условиях участия в ней размещается на сайте <http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/3rmkpu2010/rindexfs.php>

М. В. Бобырь, канд. техн. наук, доц.,
В. С. Титов, д-р техн. наук, проф.,
 Курский государственный технический
 университет
 fregat_mn@rambler.ru
 titov-kstu@rambler.ru

Метод коррекции параметров режима резания в системах с ЧПУ*

Рассмотрен метод коррекции параметров режима резания в целях компенсации возмущающих воздействий, влияющих на точность токарной обработки поверхностей деталей на оборудовании с ЧПУ в режиме реального времени на основе нечеткой логики. Приведен пример коррекции параметров режима резания на основе нечетких интервалов, поясняющий суть работы данного метода.

Ключевые слова: коррекция параметров режима резания, оборудование с ЧПУ, нечеткая логика, нечеткие интервалы

Введение

Одним из главных показателей качества обрабатываемых деталей на оборудовании с ЧПУ, от которого зависят эксплуатационные характеристики выпускаемого изделия, является точность обработанных поверхностей, под которой понимается степень соответствия полученного размера эталону. При этом для достижения требуемой точности используются следующие методы:

- обработка деталей по разметке с использованием пробных проходов;
- автоматическая обработка с настройкой режущего инструмента на заданный размер;
- автоматическая обработка на оборудовании с ЧПУ.

Однако при использовании любого из вышеперечисленных способов при обработке партии деталей на одном и том же оборудовании с одним и тем же инструментом размеры деталей будут немного отличаться друг от друга. Это объясняется наличием погрешностей, возникающих в зоне резания в режиме реального времени, например, из-за неправильного позиционирования и/или различных способов установки датчиков на оборудовании с ЧПУ. Если датчики установлены на осях X , Y нуля станка, то к общей погрешности добавляется погрешность люфта опорных подшипников, который возникает при смене направления вращения вала.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-470.2009.8 "Теоретические основы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами на основе нечеткой логики".

Особенности автоматической обработки деталей на оборудовании с ЧПУ

При использовании первого метода точность зависит исключительно от квалификации рабочего, так как после каждого прохода режущего инструмента по поверхности детали оператор самостоятельно контролирует полученные размеры и на основе своего опыта принимает решение о том, какой припуск необходимо еще снять, чтобы получить заданный размер.

Во втором методе точность определяется двумя факторами. С одной стороны, она зависит от способа настройки режущего инструмента на заданный размер, а с другой — от квалификации наладчика токарного оборудования.

С точки зрения автоматизации технологических процессов наиболее универсальным является способ обработки деталей на оборудовании с ЧПУ. При этом методе точность обработанных поверхностей деталей определяется эффективностью действия систем управления станка с ЧПУ, а случаи вмешательства оператора станка в процесс изготовления детали сведены к минимуму [1].

В общем виде задача компенсации влияния погрешностей на точность обработанных поверхностей деталей решается в два этапа: на первом строится математическая модель, в которой учитываются погрешности, влияющие на точность, и на ее основе разрабатывается система коррекции погрешностей, возникающих при токарных операциях; на втором этапе на основе построенной математической модели выбираются управляющие параметры режима резания, а именно подачи и скорости резания.

При этом важными функциями систем управления точностью обработки деталей на оборудовании с ЧПУ является сбор и обработка информации, поступающей от различных датчиков, а также коррекция режима резания при наличии возмущающих воздействий, действующих на заготовку в зоне резания. При этом наиболее значимым аспектом управления является выбор управляющих параметров технологического процесса, к которым относятся подача и скорость резания [2]. В ходе проводимых исследований авторами была разработана автоматическая система управления (АСУ) точностью обработки деталей на оборудовании с ЧПУ в режиме реального времени. На рис. 1 приведена ее структурная схема.

АСУ управления точностью обработки деталей работает следующим образом. Импульсы выходного сигнала переменного напряжения от силовометрического датчика 4 поступают на операционный усилитель 6, который одновременно сравнивает полученные сигналы с эталонным значением напряжения на резисторе 7. Если значения совпадают, то обработка продолжается. Если нет, то выполняется перерасчет силы резания на основании изменения параметров режима резания (подачи и

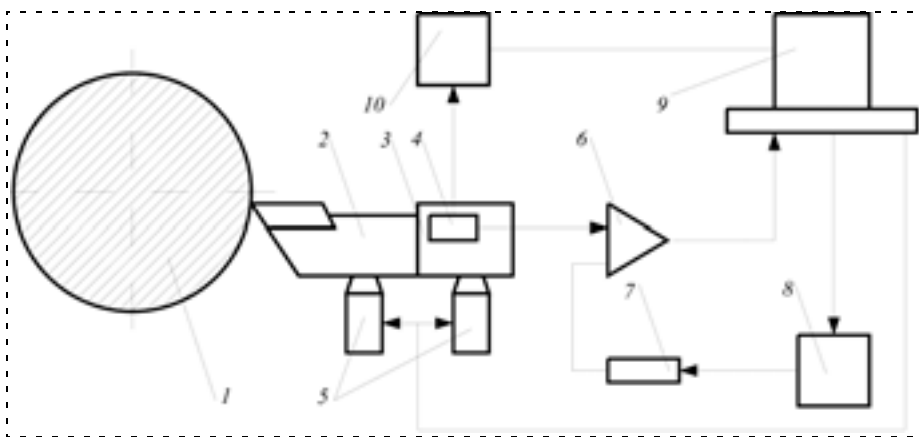


Рис. 1. АСУ точностью обработки деталей на оборудовании с ЧПУ: 1 — деталь; 2 — резец; 3 — резцедержатель; 4 — силовой датчик; 5 — исполнительные механизмы с ЧПУ; 6 — операционный усилитель; 7 — резистор; 8 — контроллер; 9 — компьютер; 10 — аналого-цифровой преобразователь

скорости резания). Для этого текущее значение силы резания передается от силовой датчика 4 посредством аналого-цифрового преобразователя 10 на компьютер 9. По способу, основанному на использовании нечетких интервалов, осуществляется коррекция параметров режима резания в автоматическом режиме, который происходит в компьютере 9 (рассмотрен ниже).

Значения подачи и скорости резания изменяются таким образом, чтобы результат прогнозирования силы резания P , определенной до процесса обработки, совпал с текущим значением силы резания, значение которой определяется с помощью силового датчика 4 [3]. Как только в результате коррекции данные совпадают друг с другом, перерасчитанные параметры режима резания (подача и скорость резания) с компьютера 9 передаются на исполнительные механизмы оборудования с ЧПУ 5. Таким образом, осуществляется автоматическая коррекция и обеспечивается постоянство силы резания. При этом эталонное значение напряжения, соответствующее рассчитанному значению силы резания P для различных токарных операций на оборудовании с ЧПУ, определяется в компьютере 9 по формуле

$$P_i = 10 C_p V_i^n S_i^y t_i^l K_p,$$

где C_p — общий коэффициент, зависящий от рода обрабатываемого материала, от вида обработки, инструментального материала и других общих параметров; t_i , S_i , V_i — параметры режима резания: глубина, подача и скорость резания, соответственно; l , y , n — показатели степени при параметрах режимов резания; K_p — поправочный коэффициент; здесь и далее i — номер операции.

Далее сигнал напряжения через контроллер 8 передается на резистор 7. Операционный усилитель 6 настраивается таким образом, чтобы генерировать импульсы на выходе только тогда, когда сигнал выходного напряжения, поступивший от силового датчика 4, не равен эталонному

значению напряжения на резисторе 7. После этого от силового датчика 4 текущее значение силы резания поступает через аналого-цифровой преобразователь 10 в компьютер 9, где начинается коррекция параметров режима резания.

Нечеткая модель коррекции параметров режима резания

Рассмотрим процесс коррекции параметров управления для токарной операции технологического процесса обработки деталей на основе нечеткой логики. В рассматриваемой задаче значения носителя нечеткого интер-

вала — левого и правого коэффициентов нечеткости α и β — назначаются на этапе обучения системы как начальное α_s и конечное β_s значения рекомендуемых диапазонов подачи $[\alpha_s; \beta_s]$ и начальное α_v и конечное β_v значения скорости резания $[\alpha_v; \beta_v]$ [4].

Смысловое содержание параметров α_s , β_s , α_v , β_v , \underline{s}_i , \bar{s}_i , \underline{v}_i , \bar{v}_i следующее. Пусть задан рекомендованный интервал для подачи (0,2; 0,9) — данные из паспорта станка, т. е. задан левый и правый коэффициенты нечеткости нечеткого интервала $\alpha = 0,2$, $\beta = 0,9$. Эксперт назначает для чернового точения подачу из диапазона (0,4; 0,6) мм/об [5, стр. 267, табл. 12, столбец 9] при глубине резания $t = 2$ мм и вылете резца 125 мм, т. е. ядро нечеткого интервала составляет $\underline{s}_i = 0,4$; $\bar{s}_i = 0,6$. Теперь можно вычислить носитель нечеткого интервала подачи $\alpha_s = \underline{s}_i - \alpha = 0,4 - 0,2 = 0,2$ и $\beta_s = \beta - \bar{s}_i = 0,9 - 0,6 = 0,3$. Затем формируется нечеткий интервал $(\underline{s}_i, \bar{s}_i, \alpha_s, \beta_s) = (0,4; 0,6; 0,2; 0,3)$, который графически представлен на рис. 2. Аналогично формируется нечеткий интервал для значений скорости резания.

Основной причиной появления погрешностей геометрической формы является воздействие силы резания P_i , поэтому в большинстве высокоточных автоматических систем управление точностью обработки осуществляется именно по этому параметру.

Значение $x_i \in [\alpha; \beta]$ для каждой i -й операции определяется по формуле

$$x_i = S_i V_i = \frac{P_i}{K_i}, \quad (1)$$

где S_i и V_i — значения подачи и скорости для каждой i -й токарной операции технологического процесса; K_i — величина, зависящая от геометрических характеристик заготовки, которая рассчитывается по формуле



Рис. 2. Представление нечеткого интервала для подачи

$$K_i = V^n S^y = \frac{P_y}{10 C_p t^x K_p}$$

Для нечетких интервалов S_i и V_i , характеризующих подачу s_i и скорость резания v_i и имеющих вид $S_i = (\underline{s}_i, \bar{s}_i, \alpha_s, \beta_s)$, $V_i = (\underline{v}_i, \bar{v}_i, \alpha_v, \beta_v)$, переменная функции принадлежности λ' для каждой i -й операции технологического процесса определяется произведением нечетких интервалов по уравнению [6]

$$\lambda' = \begin{cases} \mu_{V_i \otimes S_i} \left(\frac{P_y}{K_i} \right) = \\ = L \left(\frac{\underline{s}_i \alpha_v + \underline{v}_i \alpha_s - \sqrt{(\underline{v}_i \alpha_s - \underline{s}_i \alpha_v)^2 + 4 \alpha_s \alpha_v \left(\frac{P_i}{K_i} \right)}}{2 \alpha_s \alpha_v} \right), \\ \text{если } x_i \in [\underline{\alpha}; \underline{m}]; \\ 1, \text{ если } x_i \in [\underline{m}; \bar{m}]; \\ \bar{\mu}_{V_i \otimes S_i} \left(\frac{P_y}{K_i} \right) = \\ = L \left(\frac{-\bar{s}_i \beta_v - \bar{v}_i \beta_s + \sqrt{(\bar{v}_i \beta_s - \bar{s}_i \beta_v)^2 + 4 \beta_s \beta_v \left(\frac{P_i}{K_i} \right)}}{2 \beta_s \beta_v} \right), \\ \text{если } x_i \in [\bar{m}; \beta]. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь \otimes — операция нечеткого умножения для нечетких интервалов.

При этом значения подачи s'_i и скорости резания v'_i определяются по полученному значению λ' . Если λ' равна единице ($\lambda' = 1$), $x_i \in [\underline{m}; \bar{m}]$, то, обозначая $[\underline{s}_i, \bar{s}_i]$, $[\underline{v}_i, \bar{v}_i]$ предпочтительные области значений подачи и скорости резания, имеем более одной разрешенной регулировки, для которой всякое увеличение скорости резания приведет к ухудшению точности и наоборот:

$$s'_i \in [\underline{s}_i, \bar{s}_i] \cap \left[\frac{P_i}{K_i \bar{v}_i}, \frac{P_i}{K_i \underline{v}_i} \right],$$

$$v'_i \in [\underline{v}_i, \bar{v}_i] \cap \left[\frac{P_i}{K_i \bar{s}_i}, \frac{P_i}{K_i \underline{s}_i} \right].$$

Если значение переменной $\lambda'(2)$ принадлежит интервалу $0,1 < \lambda' < 1$, то параметры управления s'_i и v'_i определяются в зависимости от того, к какой области (I, II или III на рис. 2) принадлежит значение x_i :

$$s'_i = \begin{cases} \underline{s}_i - \alpha_s L(\lambda'), \text{ если } P_i > \underline{s}_i \times \underline{v}_i \times K_i; \\ \underline{s}_i + \beta_s L(\lambda'), \text{ если } P_i < \underline{s}_i \times \underline{v}_i \times K_i. \end{cases} \quad (4)$$

$$v'_i = \begin{cases} \underline{v}_i - \alpha_v L(\lambda'), \text{ если } P_i > \underline{s}_i \times \underline{v}_i \times K_i; \\ \underline{v}_i + \beta_v L(\lambda'), \text{ если } P_i < \underline{s}_i \times \underline{v}_i \times K_i. \end{cases}$$

Если $\lambda' < 0,1$, то качество обработки деталей не соответствует требуемой точности, а размеры обработанных поверхностей выходят за требуемые поля допусков на размер.

Численный пример коррекции параметров режима резания

Рассмотрим этапы коррекции параметров режима резания на основе следующего алгоритма, состоящего из четырех шагов. На первом шаге необходимо найти ядро и носитель нечеткого интервала, графически представленного на рис. 2. На втором шаге по формуле (1) определяют принадлежность x_i нечеткому интервалу для каждой технологической операции, и область (I, II или III, см. рис. 2), в которой будет находиться значение этого параметра. На третьем шаге в зависимости от области расположения x_i по формуле (3) рассчитывается оптимальная степень удовлетворения λ_i параметров режима резания. И на заключительном шаге происходит процесс перерасчета по формулам (3) или (4) параметров режима резания подачи s'_i и скорости резания v'_i .

Рассмотрим численный пример назначения параметров режимов резания при выполнении токарной операции (черновое и чистовое точение) технологического процесса обработки деталей на оборудовании с ЧПУ (табл. 1).

Шаг 1. Определяются ядро и носитель нечеткого интервала, за границы которого нельзя выходить при выборе оптимальных параметров управления технологического процесса (табл. 2).

Полученные значения представим в графическом виде (рис. 3).

Шаг 2. По формуле (1) определяется значение x_i для каждой технологической операции (рис. 3):

- для черногого точения:
 $x_1 = s_1 v_1 = \frac{P_1}{K_1} = 80\ 000$;
- для чистового точения:
 $x_2 = s_2 v_2 = \frac{P_2}{K_2} = 62\ 000$.

Из получившихся результатов устанавливается, что для черногого точения значение x_i принадлежит интервалу III, а для чистового точения x_i принадлежит интервалу II.

Шаг 3. Определяются оптимальные значения λ' и оптимальные параметры управления технологическим процессом обработки деталей.

Для черновой токарной операции технологического процесса оптимальное значение λ' определяется с учетом того, что значение x_i принадлежит III интервалу (рис. 3, а), по формуле (2):

$$\lambda' = \frac{-0,6 \cdot 10\ 000 - 120\ 000 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,3 \cdot 10\ 000} + \frac{\sqrt{(120\ 000 \cdot 0,3 - 0,6 \cdot 10\ 000)^2 + 4 \cdot 0,3 \cdot 10\ 000 \cdot 80\ 000}}{2 \cdot 0,3 \cdot 10\ 000} = 0,19$$

Таблица 1

Исходные данные для токарной операции

Операция	P_i , Н	K_i	S_i , мм/об		V_i , м/мин	
			Рекомендованный интервал	Нечеткий интервал	Рекомендованный интервал	Нечеткий интервал
Черновое точение	12	0,0015	(0,2; 0,9)	(0,4; 0,6; 0,2; 0,3)	(70; 130)	(90; 120; 20; 10)
Чистовое точение	155	0,0025	(0,4; 0,6)	(0,5; 0,55; 0,1; 0,05)	(115; 130)	(120; 125; 5; 5)

Таблица 2

Ядро и носитель нечеткого интервала

Параметры	Черновое точение	Чистовое точение
$\alpha_i = (\underline{s}_i - \alpha_s)(\underline{v}_i - \beta_v)$	14 000	46 000
$\underline{m}_i = \underline{s}_i \underline{v}_i$	36 000	60 000
$\bar{m}_i = \bar{s}_i \bar{v}_i$	72 000	68 750
$\beta_i = (\bar{s}_i + \alpha_s)(\bar{v}_i + \beta_v)$	117 000	78 000

Примечание. Значения получены с учетом перевода единиц измерения.

Таблица 3

Результаты уточнения оптимальных параметров управления

Операция	Рекомендованный интервал		Уточненные значения	
	S_i , мм/об	V_i , м/мин	S'_i , мм/об	V'_i , м/мин
Черновое точение	(0,4; 0,6; 0,2; 0,3)	(90; 120; 20; 10)	0,84	128,1
Чистовое точение	(0,5; 0,55; 0,1; 0,05)	(120; 125; 5; 5)	0,505	122

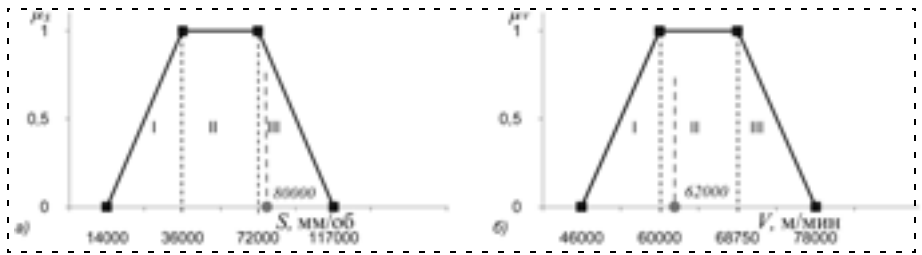


Рис. 3. Нечеткий интервал: а — черновое точение, б — чистовое точение

Шаг 4. Далее по формуле (4) для черновой операции вычисляются перерасчитанные параметры процесса управления s'_i и v'_i :

$$s'_i = 0,6 + 0,3 \cdot (1 - 0,19) = 0,84 \text{ мм/об};$$

$$v'_i = 120 + 10 \cdot (1 - 0,19) = 128,1 \text{ м/мин}.$$

Для чистового точения (рис. 3, б) значение x_i принадлежит II интервалу, следовательно, $\lambda' = 1$, и скорректированные значения подачи и скорости s'_i и v'_i определяются по формуле (3):

$$s'_1 \in [0,5; 0,55] \cap \left[\frac{155}{0,0025 \cdot 125\ 000} \right];$$

$$\frac{155}{0,0025 \cdot 120\ 000}] = [0,5; 0,55] \cap [0,49; 0,51] = [0,5; 0,51] \text{ мм/об};$$

$$v'_1 \in [120; 125] \cap \left[\frac{155}{0,0025 \cdot 0,55} \right];$$

$$\frac{155}{0,0025 \cdot 0,5}] = [120; 125] \cap [113; 124] = [120; 124] \text{ м/мин}.$$

Полученные значения режимов резания уточняются, используя метод центра тяжести:

$$s'_1 = \frac{0,5 + 0,51}{2} = 0,505 \text{ (мм/об)};$$

$$v'_1 = \frac{120 + 124}{2} = 122 \text{ (м/мин)}.$$

Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таким образом, с помощью разработанной математической модели коррекции параметров режима резания управление точностью обработки деталей на оборудовании с ЧПУ не представляет особой сложности. На способ коррекции параметров режима резания получен патент № 2379169 [7].

Заключение

В статье приведен метод коррекции параметров режима резания при обработке деталей на токарном оборудовании с ЧПУ в режиме реального времени. На основе нечеткой логики проведено численное моделирование, дающее возможность оце-

нить эффективность предложенного авторами способа коррекции режима резания.

Список литературы

1. Ловыгин А. А., Васильев А. В., Кривцов С. Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М.: Эльф ИПР, 2006. 286 с.
2. Мартинов Г. М., Любимов А. Б., Обухов А. И. Проблема адаптации систем ЧПУ класса PCNC к станкам лазерной графики // Мехатроника, автоматизация, управление. М., 2009. № 1. С. 59–62.
3. Титов В. С., Бобыр М. В., Милостная Н. А. Устройство прогнозирования на оборудовании с ЧПУ качества обработан-

ных поверхностей детали / Пат. № 2325247. Изобретения № 15, кл. В 23В 25/06. 2008.

4. Бобыр М. В., Емельянов С. Г., Титов В. С. Теоретические основы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами на основе нечеткой логики: монография. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2009. 232 с.

5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под. ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

6. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: Пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.

7. Бобыр М. В., Титов В. С., Яхонтова Е. С. Способ и устройство управления точностью обработки деталей / Пат. РФ. № 2379169. Изобретения № 2, кл. В23Q15/02. 2010. 12 с.

УДК 629.047+519.852

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет)
K301@mail.ru

Постановка задачи оптимального управления технологическими процессами для обеспечения динамической устойчивости промышленного производства в кризисных ситуациях*

Ставится актуальная задача обеспечения динамической устойчивости промышленного производства в кризисных ситуациях. Оптимальное управление технологическими процессами обеспечивает осторожное сокращение и расширение производственных мощностей при периодически меняющейся рентабельности.

Ключевые слова: оптимальное управление, переменная рентабельность, динамическая устойчивость

Введение

Вопрос обеспечения устойчивости функционирования промышленного производства при возникающих изменениях внешних и внутренних факторов является чрезвычайно важным, особенно в кризисных ситуациях. В частности, к таким факторам относится изменение качества поступающего сырья и, как следствие, существенные колебания рентабельности производства $p(t)$, которая становится функцией времени. Примером такого производства является процесс обогащения алмазной руды, рассмотренный в [1], когда случайным

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 08-08-0012а.

**Под расширенным производством понимается случай производства с растущей прибылью.

образом меняются как скорость поступления руды на сортировку, так и ее качество.

Первые попытки рассмотреть временные процессы с учетом динамики производственных и экономических объектов были сделаны в работах [2–5], посвященных описанию этих процессов с позиции теории автоматического регулирования. Основное внимание было уделено анализу условий неуправляемого расширенного производства** с помощью операторных динамических звеньев, тем более с учетом нужных критериев оптимальности и требуемых запасов устойчивости.

В связи с этим возникает необходимость соответствующего регулирования во времени доли $\beta(t)$ дохода, получаемого в единицу времени и направляемого на вход производственного звена через положительную обратную связь. Фактически речь идет о рациональном управлении этой долей таким образом, чтобы при резком снижении рентабельности вплоть до отрицательных значений приступить к сокращению производства при $\beta(t) \rightarrow 0$, а при возрастании рентабельности при $p(t) > 0$ осуществлять "осторожное" расширение производства, помня о том, насколько в период кризиса болезненно его сокращение.

Естественно, желательно решить задачу управления так, чтобы оно было в некотором смысле оптимально с точки зрения итоговой прибыли, а главное, обеспечило бы устойчивое существование системы на заданном большом интервале времени T , превышающем период колебаний рентабельности.

Постановка задачи

Постановку задачи оптимального управления промышленным производством можно сформулировать следующим образом.

1. Задано производственное звено с известным периодом τ оборота капитала, которое можно представить в виде апериодического звена [1], и если принять пока при $p(t) = p$ долю $\beta(t)$ получаемого в единицу времени дохода у константой ($\beta(t) = \beta$), то можно записать следующее уравнение:

$$\dot{y} = \frac{(1+p)y\beta - y}{\tau}; 0 \leq \beta \leq 1. \quad (1)$$

2. Считается, что время τ оборота капитала постоянно, т. е. процесс разработки и внедрения новой технологии в производство пока не рассматривается.

3. Считается, что оставшаяся часть дохода $(1-\beta)y$ накапливается в банке при допущении о том, что полученная продукция имеет спрос, и цена ее неизменна. Поэтому к определенному моменту времени накопленный капитал z может быть оценен следующим образом:

$$\dot{z} = (1-\beta)y, \quad (2)$$

где $z(t_0) = \Phi_0$ — начальный стартовый капитал.

4. Уравнения (1) и (2) являются традиционными [5], которые теперь при нестационарном поведении системы нужно видоизменить. Можно показать, что при $\dot{\beta}(t) \neq 0$ уравнения (1)–(2) необходимо переписать по-другому:

$$\dot{y} = \frac{[1+p(t)]y\beta(t) - y}{\tau} + \frac{z(1+p(t))}{\tau} \dot{\beta}(t); \quad (3)$$

$$\dot{z} = [1-\beta(t)]y.$$

5. Теперь необходимо оценить определенным образом качество функционирования системы с позиций ее устойчивости и прибыльности. Поскольку в периоды кризисов часть накопленного капитала z будет изыматься для покрытия убытков, а в другое время будет возрастать, потребуем, чтобы его текущее среднее значение x_1 было либо хотя бы неубывающим, либо медленно, но неуклонно растущим в соответствии с заданной желаемой функцией

$$F(t) = \Phi_0 + kt, \text{ где } k \geq 0.$$

Текущее среднее за время t значение x_1 накопленного капитала определяется уравнением

$$\dot{x}_1 = \frac{z - x_1}{t}. \quad (4)$$

6. Зададимся для синтеза оптимального способа управления производством минимизируемым значением интегрального функционала J , как это принято в теории оптимального управления [1, 6]:

$$J = \min \int_0^T [(x_1 - F(t))^2 + r_1 \beta^2 + r_2 (\dot{\beta})^2] dt. \quad (5)$$

Смысл предложенного критерия состоит в том, что на длительном периоде T минимизируются три слагаемых. Первое слагаемое преследует цель избежать слишком больших изменений в накоплениях, особенно в затратах на возмещение убытков. Второе слагаемое штрафует слишком большие отклонения от текущего ежемесячного дохода.

Наиболее существенным новым элементом является третье слагаемое, которое штрафует "скорости отдачи" $\dot{\beta}(t)$ как при расширении, так и, особенно, при сокращении производства. Степень осторожности в выборе доли $\beta(t)$ определится назначенными коэффициентами штрафа r_1 и r_2 .

Перечисленных допущений достаточно, чтобы сформулировать задачу в математической форме, принятой в теории оптимального управления, для чего введем следующие обозначения: $z = x_2$, $y = x_3$, $\beta(t) = x_4$, $\dot{\beta}(t) = u$.

Тогда задача оптимального синтеза способа управления производством выглядит так:

- задан объект управления в форме Коши

$$\dot{x}_1 = \frac{x_2 - x_1}{t};$$

$$\dot{x}_2 = (1 - x_4)x_3;$$

$$\dot{x}_3 = \frac{[1+p(t)]x_4x_3 - x_3}{\tau} + \frac{x_2[1+p(t)]}{\tau} u;$$

$$\dot{x}_4 = u;$$

- задан минимизируемый интегральный функционал, характеризующий общий риск

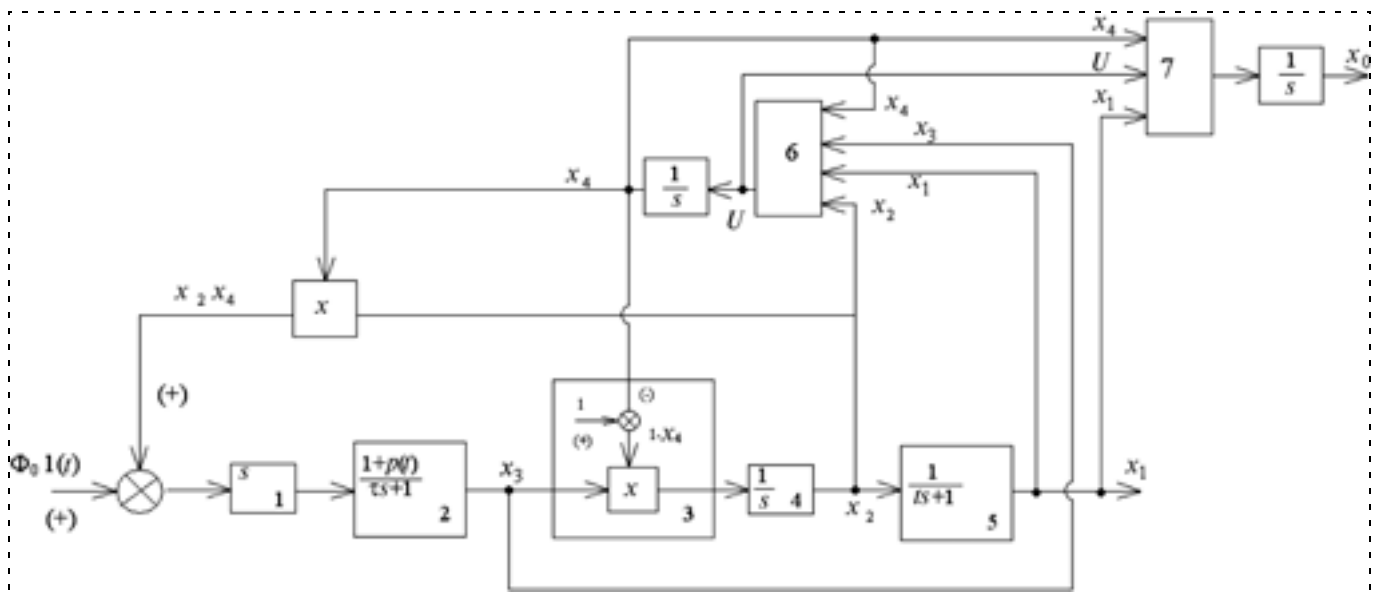
$$x_0 = \min \int_0^T [(x_1 - F)^2 + r_1 x_4^2 + r_2 u^2] dt;$$

- требуется найти управление u как функцию вектора $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ состояния системы, минимизирующее риск в кризисных ситуациях.

Предлагаемый подход к решению задачи оптимального управления

В данной статье предлагается смотреть на проблему обеспечения нужной устойчивости как на задачу построения системы автоматического управления технологическим процессом, структурная схема которой представлена на рисунке.

На структурной схеме приняты следующие обозначения: Φ_0 — стартовый капитал; $1(t)$ — единичная ступенчатая функция; t — текущее время; τ — время оборота производственных фондов (капитала); $p(t)$ — переменная рентабельность производства; x_4 — доля стоимости выходной продукции, направляемой для возобновления производства; x_3 — стоимость произведенной продукции в единицу времени; x_2 — накапливаемая прибыль, неиспользуемая в развитии производства; x_1 — среднее текущее значение прибыли за весь жизненный цикл производства в течение времени t ; x_0 — минимизируемый интегральный показатель несовершенства качества управления; \boxtimes — блок умножения; I — оператор Лапласа s ; 2 — производственное зве-



Структурная схема оптимального управления технологическим процессом при переменной рентабельности производства

но; 3 — звено отчисления части дохода в чистую прибыль; 4 — интегратор финансовых накоплений прибыли; 5 — блок оценки текущего среднего значения накопленной прибыли; 6 — регулятор управления скоростью u отчисления доли доходов для возобновления производства; 7 — оператор вычисления штрафной функции, определяющей после интегрирования значение x_0 минимизируемого функционала качества.

Известно [2, 5], что при $p(t) = p$ доля x_4 возвращаемых в производство доходов может влиять таким образом, что при $x_4 > \frac{1}{1+p}$ имеем расширенное производство, при $x_4 = \frac{1}{1+p}$ — простое воспроизводство без изменения ежемесячной прибыли, а при $x_4 < \frac{1}{1+p}$ — убыточное производство. Значит, рационально влияя на изменение производственных мощностей, можно в благоприятный период накапливать прибыль, а в период спада нивелировать болезненное сокращение производства и, как следствие, безработицу.

Решение этой задачи возможно с помощью метода динамического программирования [6] и требует дополнительных исследований, в первую очередь, при выяснении условий устойчивости бескризисного производства. Однако очевидно, что доля дохода, передаваемого на вход производственного звена, в первую очередь зависит как от текущей прибыли, определяемой через x_3 , так и от накопленного капитала x_2 , и эта доля должна стабилизировать его среднее значение x_1 при изменяющейся рентабельности производства.

Заключение

В данной статье получены следующие основные результаты:

1. Поставлена задача оптимального управления технологическим процессом при выбранном интегральном функционале, обеспечивающем осторожные изменения производственного звена в кризисных ситуациях.

2. Под устойчивостью промышленного производства понимается поддержание в среднем финансовых накоплений, либо их заданный рост по сравнению с первоначальным капиталом, что указывает на успешное решение задачи стабилизации.

3. Предложен подход к решению задачи с помощью метода динамического программирования, синтезирующего структуру регулятора как функцию вектора состояния системы.

4. Полученная схема замкнутой системы управления технологическим процессом может быть основой для дополнительных исследований совершенствования технологии за счет инвестиций, отчисляемых от прибыли, и учета изменяющегося спроса и цены продукции.

Список литературы

1. Лебедев Г. Н., Щеткин С. Л. Разработка оптимального управления процессом обогащения руды при ее сортировке // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 7. С. 34—37.
2. Ланге О. Введение в экономическую кибернетику. Под ред. Е. З. Майминаса. М.: Прогресс. 1968.
3. Кобринский Н. Е. Основы экономической кибернетики. М.: Прогресс, 1969.
4. Багриновский К. А. Модели и методы экономической кибернетики. М.: Экономика, 1973.
5. Царьков В. А. Экономическая динамика и эффективность капитальных вложений. М.: Лексикон, 1997. 101 с.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: ИИЛ, 1961. 231 с.

В. С. Щербаков, д-р техн. наук, проф.,
М. С. Корытов, канд. техн. наук, доц.,
М. Г. Григорьев, аспирант,
 Сибирская государственная автомобильно-
 дорожная академия, г. Омск
 kms142@mail.ru

Синтез алгоритма автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины

Предложен алгоритм работы системы автоматического горизонтирования опорной платформы строительных машин с выносными, выдвижными или откидными гидравлическими опорами и поддержания ее на заданной высоте в процессе работы машины. Алгоритм позволяет предотвратить ситуации отрыва опор от грунта, выдвижения штоков гидроцилиндров опор на максимальную длину, а также касания колесами машины опорной поверхности. Это повышает запас управляемости углами наклона платформы.

Ключевые слова: платформа, горизонтирование, строительная машина, выравнивание, отрыв опоры

Введение

Строительная машина во время работы является объектом повышенной опасности, многие внешние факторы влияют на стабильность и безопасность ее работы.

В процессе работы угол наклона опорной платформы к горизонту не должен превышать предельное значение. Это вынуждает оператора часто останавливать технологический процесс и вручную корректировать положение платформы, что приводит к простоям, снижению производительности труда и, как следствие, повышению затрат на выполнение работ [1, 2, 3].

Для решения данной проблемы применяются системы автоматического горизонтирования опорной платформы [4, 5, 6]. Однако существующие системы горизонтирования платформ с гидравлическими опорами обладают рядом недостатков. Выравнивание платформы происходит последовательно в два этапа (вначале устраняется поперечный наклон платформы, затем продольный), что занимает значительное время. В ряде случаев необходимо повторение цикла. При подобной схеме выравнивания возможны: неравномерное нагружение опор, а также возникновение ситуации выдвижения штоков на максимальную длину либо касания колесами машины опорной поверхности.

Указанные недостатки являются следствием: 1) такого расположения двух датчиков наклона опорной платформы, при котором один измеряет поперечный наклон платформы относительно го-

ризонтовой плоскости, а другой — продольный наклон платформы; 2) ограничения на число одновременно выдвигаемых гидроцилиндров; 3) ограниченного времени работы систем, не предназначенных для постоянного автоматического поддержания опорной платформы в горизонтальном положении. Не используется возможность автоматического горизонтирования одновременным выдвиганием и втягиванием различных опор.

В целях устранения ряда недостатков существующих систем авторами предложен оригинальный подход, основная идея которого заключается в отказе от измерения традиционно используемых в качестве информационных параметров углов крена и тангажа в продольном и поперечном направлениях платформы и измерении вместо них углов наклона двух диагоналей платформы. Данный подход позволяет учесть конструктивные особенности опорной платформы строительной машины и технологические особенности ее эксплуатации с позиции автоматизации процесса горизонтирования.

Особенности опорной платформы строительной машины как объекта автоматизации горизонтирования

При вывешивании платформы строительной машины на выносных гидравлических опорах необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- 1) отрыв всех ходовых элементов (пневмоколес) под опорной платформой от грунта (рис. 1);
- 2) горизонтирование платформы (обеспечение нулевых углов наклона диагональных осей платформы α_x , α_y относительно горизонтальной плоскости);
- 3) предотвращение отрыва выносных опор от грунта (обеспечение определенной минимальной нагруженности каждой опоры по силе нормальной реакции со стороны грунта на шток гидроцилиндра).

Кроме того, для повышения управляемости углами наклона платформы предлагается добавить четвертое дополнительное условие:

- 4) непрерывное автоматическое поддержание платформы на заданной высоте, при которой достигается оптимальное сочетание значений запасов ходов штоков гидроцилиндров. Опорная платформа при этом выводится в такое положение по высоте (условно "срединное" по запасам ходов штоков гидроцилиндров вверх и вниз), при котором возможна максимальная коррекция углов наклона платформы при последующем возможном ее "сползании" из-за проседания опор.

Для строительных машин, большинство из которых имеет прямоугольный опорный контур с четырьмя гидравлическими опорами, использование углов наклона диагоналей платформы вместо углов крена и тангажа позволяет устранить перекрестные связи между опорами, выполнять одновременное

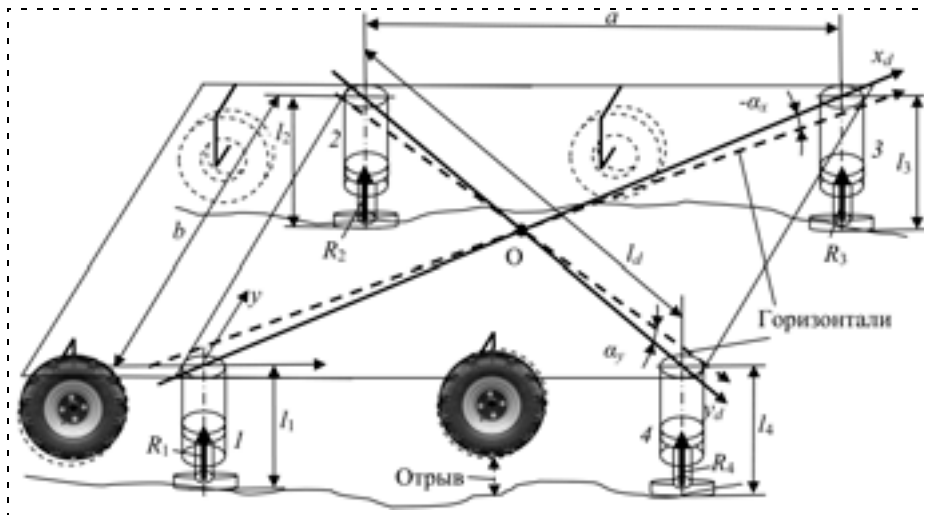


Рис. 1. Опорная платформа строительной машины

горизонтирование по двум углам наклона диагоналей, осуществлять горизонтирование по каждому углу за счет одновременного выдвигания одной диагональной опоры и втягивания противоположной. Была разработана система автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины с использованием датчиков углов наклона диагоналей платформы, а также датчиков давления гидрожидкости и положения штоков гидроцилиндров опор.

Система автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины

Задачей предлагаемой системы является повышение быстродействия автоматического выравнивания опорной платформы в горизонтальной плоскости, автоматическое поддержание ее в горизонтальном положении на заданной оптимальной высоте, предотвращение аварийных ситуаций потери устойчивости платформы.

Система включает в себя платформу 1 и присоединенные к ней по углам четыре гидроцилиндра опор 2, 3, 4, 5 (рис. 2). На платформе закреплены два датчика угла наклона диагоналей платформы 6 и 7.

Каждый из гидроцилиндров 2, 3, 4, 5 оборудован датчиком положения штока 8 и двумя датчиками измерения давления 9 и 10 — в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра соответственно. Датчики угла наклона своими выходами соединены с информационными

входами блока управления (БУ) 11, входящего в состав системы управления. Другими информационными входами БУ 11 связан с датчиками положения штока 8 и датчиками давления 9 и 10. Управляющими выходами БУ 11 связан с четырехсекционным электрогидрораспределителем 12, выходы которого, в свою очередь, подключены к входам гидроцилиндров 2, 3, 4, 5. Другой управляющий выход БУ является входом блока аварийной остановки машины 13. Включение и отключение устройства осуществляется блоком включения/выключения 14, выход которого является входом БУ.

Датчики наклона расположены относительно платформы таким образом, чтобы измерительные оси датчиков были перпендикулярны диагональным вертикальным плоскостям платформы.

Для описания работы системы был проведен синтез алгоритма автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы.

Примем следующие условные обозначения (рис. 1, 3): l_1, l_2, l_3, l_4 — длины гидравлических опор (гидроцилиндров) от нижней поверхности подпятника гидроцилиндра до плоскости опорной платформы; a, b — размеры опорного контура машины; l_d — расстояние между осями двух гидроцилиндров, расположенных на одной диагонали платформы; α_x, α_y — углы наклона опорной платформы относительно горизонтальной плоскости, измерен-

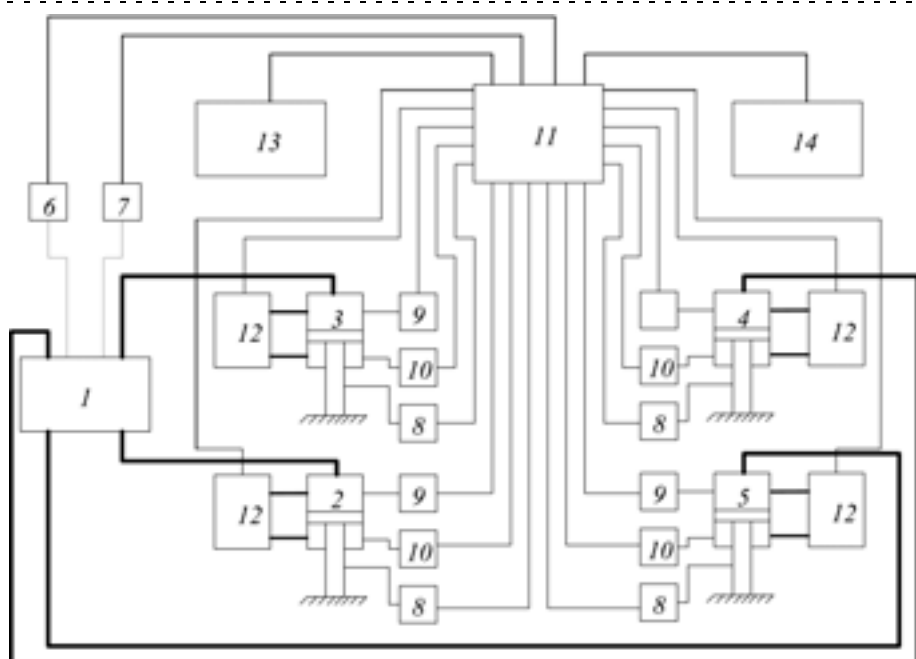


Рис. 2. Функциональная схема системы автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины

ные в двух диагональных вертикальных плоскостях платформы; z_1, z_2, z_3, z_4 — вертикальные координаты грунта под четырьмя выносными опорами соответственно; l_0 — минимальное значение длины каждой из гидравлических опор при полностью втянутом штоке; $l_{1\min}, l_{2\min}, l_{3\min}, l_{4\min}$ — минимальные предельные значения длин гидравлических опор, соответствующие отрыву пневмоколёс от грунта для текущих значений вертикальных координат микрорельефа грунта под выносными опорами и под пневмоколесами; l_{\max} — максимальное предельное значение длины каждой из гидравлических опор, соответствующее выдвигению штока гидроцилиндра на максимальную длину; $l_{1\text{опт}}, l_{2\text{опт}}, l_{3\text{опт}}, l_{4\text{опт}}$ — оптимальные значения длин гидравлических опор, соответствующие оптимальному сочетанию значений запасов ходов штоков гидроцилиндров и горизонтированию платформы для текущих условий; $\alpha_{\text{хотр}}, \alpha_{\text{уотр}}$ — значения углов наклона диагоналей опорной платформы, соответствующих отрыву пневмоколёс от грунта для текущих значений вертикальных координат микрорельефа грунта под выносными опорами и под пневмоколесами, измеренных в вертикальных диагональных плоскостях платформы; $Z_0 = z_{13} = z_{24}$ — высота точки пересечения диагоналей платформы O над нулевой линией грунта; s_u, s_d — запасы ходов штоков совокупности гидроцилиндров опор на подъем и на опускание платформы соответственно для текущего оптимального горизонтального положения платформы и для текущих значений вертикальных координат микрорельефа грунта под выносными опорами и под пневмоколесами; ΔZ_0 — высота подъема точки O платформы от положения отрыва пневмоколёс до оптимального для текущих условий положения; R_1, R_2, R_3, R_4 — силы нормальных реакций со стороны грунта на штоке гидроцилиндров опор; G_0 — вес машины (опорной платформы с установленным на ней оборудованием без груза); $p_{п1}, p_{ш1}, p_{п2}, p_{ш2}, p_{п3}, p_{ш3}, p_{п4}, p_{ш4}$ — давления в

поршневой и штоковой полостях гидроцилиндров опор 1—4 соответственно; $S_{п}, S_{ш}$ — площади поршневой и штоковой полостей гидроцилиндра каждой опоры соответственно; t — текущее время, отсчитываемое с начала этапа алгоритма; dt — шаг дискретности времени.

Первичными измеряемыми параметрами являются: $l_1, l_2, l_3, l_4, \alpha_x, \alpha_y, p_{п1}, p_{ш1}, p_{п2}, p_{ш2}, p_{п3}, p_{ш3}, p_{п4}, p_{ш4}$. Силы R_1, R_2, R_3, R_4 косвенно рассчитываются исходя из известных площадей $S_{п}, S_{ш}$, одинаковых для всех гидроцилиндров и давлений:

$$\begin{aligned} R_1 &= p_{п1}S_{п} - p_{ш1}(S_{п} - S_{ш}); \\ R_2 &= p_{п2}S_{п} - p_{ш2}(S_{п} - S_{ш}); \\ R_3 &= p_{п3}S_{п} - p_{ш3}(S_{п} - S_{ш}); \\ R_4 &= p_{п4}S_{п} - p_{ш4}(S_{п} - S_{ш}). \end{aligned} \quad (1)$$

Параметры $a, b, l_d, l_0, l_{\max}, G_0, S_{п}, S_{ш}, R_{\min1}, R_{\min2}, R_{\min3}, R_{\min4}, v_c, v_{\min}, t_{\text{пред}}, dt$ считаются известными и постоянными.

Процесс автоматического подъема, выравнивания и поддержания опорной платформы строительной машины в горизонтальной плоскости будет состоять из шести отдельных этапов, каждый из которых будет описываться собственными функциями перемещения штоков гидроцилиндров опор. Упрощенная блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.

Этапы алгоритма

◆ *Первый этап.* Одновременно приводят в действие гидроцилиндры четырех опор, присоединенные к платформе по ее углам. В процессе выдвигения штоков гидроцилиндров непрерывно контролируют на каждом из них силу реакции R_1, R_2, R_3, R_4 , рассчитанную по (1), определяя момент времени упора в грунт с определенной минимальной силой $R_{\min1}, R_{\min2}, R_{\min3}, R_{\min4}$ на штоке каждого из гидроцилиндров. Значение $R_{\min1}, R_{\min2}, R_{\min3}, R_{\min4}$ задается в долях от расчетной доли веса платформы, приходящейся на один гидроцилиндр (например, порядка 10 % от расчетной доли веса платформы G_0 , приходящейся на один гидроцилиндр).

Автоматическое управление происходит по скоростям перемещения штоков v_1, v_2, v_3, v_4 . При превышении силой нормальной реакции на любом штоке значения R_{\min} происходит остановка или втягивание соответствующего штока. Поскольку вертикальные координаты микрорельефа грунта под каждой из опор различны, время от начала движения до упора в грунт каждой опоры также будет различно. Значения скоростей

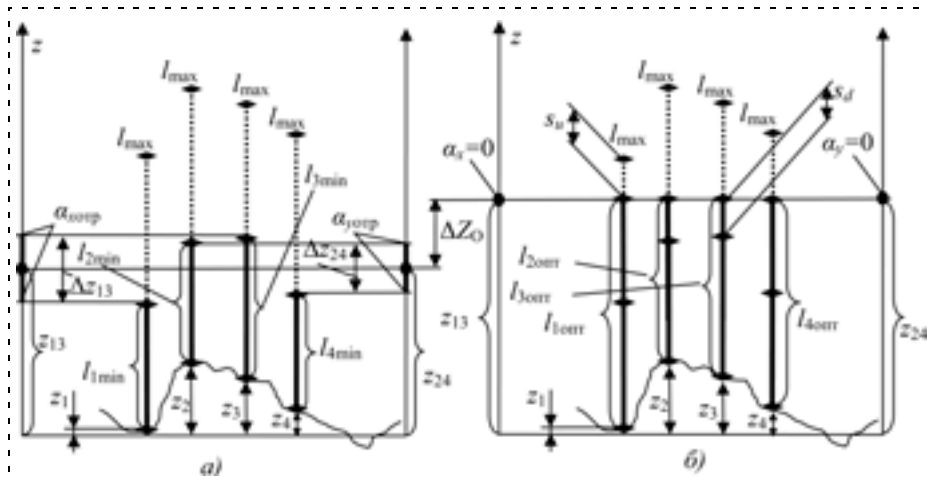


Рис. 3. Последовательные состояния платформы:

a — при отрыве пневмоколёс от грунта; b — оптимальное по запасам ходов s положение ($s_u \approx s_d$)

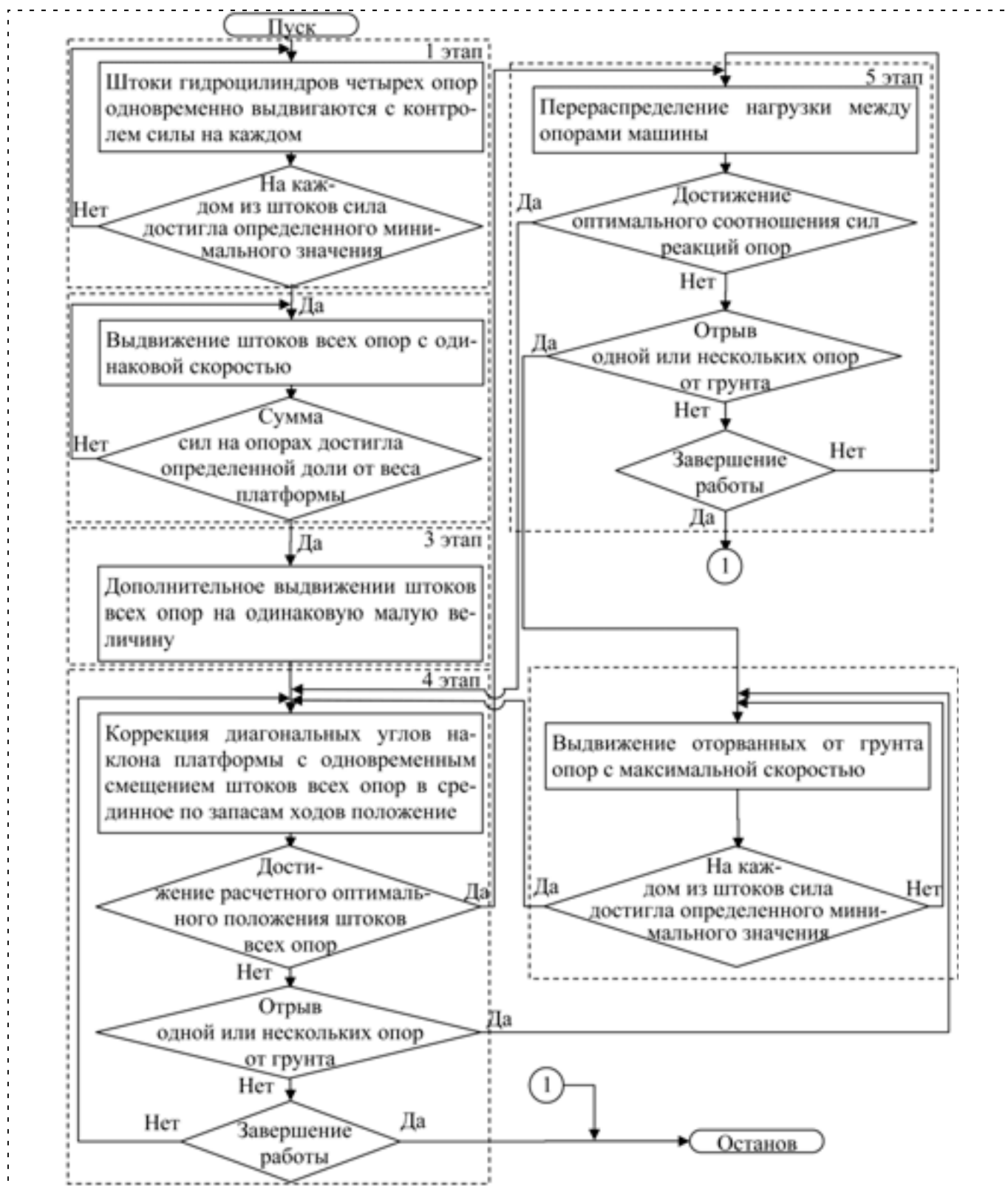


Рис. 4. Упрощенная блок-схема алгоритма

перемещения каждого штока v_1, v_2, v_3, v_4 на первом этапе будут определяться выражениями:

$$v_1 = (R_{\min 1} - R_1)k; \quad v_2 = (R_{\min 2} - R_2)k; \\ v_3 = (R_{\min 3} - R_3)k; \quad v_4 = (R_{\min 4} - R_4)k,$$

где k — коэффициент пропорциональности. Положительным значениям соответствует выдвижение штоков.

Требуемые значения длин гидроцилиндров будут рассчитываться по формулам:

$$l_1 = l_0 + v_1 t; l_2 = l_0 + v_2 t; l_3 = l_0 + v_3 t; l_4 = l_0 + v_4 t,$$

где t — время, отсчитываемое с начала этапа.

Первый этап заканчивается, когда силы на всех опорах достигнут значений, близких к R_{\min} , что формализуется следующим условием в виде булевой функции:

$$\begin{aligned} & (R_{\min 1} - \Delta R \leq R_1 \leq R_{\min 1} + \Delta R) \wedge \\ & \wedge (R_{\min 2} - \Delta R \leq R_2 \leq R_{\min 2} + \Delta R) \wedge \\ & \wedge (R_{\min 3} - \Delta R \leq R_3 \leq R_{\min 3} + \Delta R) \wedge \\ & \wedge (R_{\min 4} - \Delta R \leq R_4 \leq R_{\min 4} + \Delta R), \end{aligned} \quad (2)$$

где \wedge — знак операции логического умножения (конъюнкции); ΔR — допустимая погрешность силы.

При завершении первого этапа, т. е. при выполнении условия (2), запоминаются текущие значения длин всех гидроцилиндров: $l_{11}, l_{21}, l_{31}, l_{41}$.

После первого этапа начинает выполняться второй этап.

◆ *Второй этап.* Штоки всех гидроцилиндров опять одновременно приводят в действие с одинаковой скоростью, причем также осуществляют контроль сил нормальных реакций на опорах R_1, R_2, R_3, R_4 , вычисляемых по (1). Одновременно с выдвиганием штоков вычисляют сумму сил нормальных реакций на штоках всех гидроцилиндров R_{Σ} . При достижении суммой сил заданной величины, составляющей определенную долю от веса платформы ($0,9G_0$), останавливают выдвигание всех штоков, что завершает второй этап. Он обеспечивает надежный упор подпятников гидроцилиндров в грунт рабочей площадки, компенсацию естественных неровностей площадки и податливости грунта (проседание грунта под нагрузкой), компенсацию упругости подвески пневмоколес платформы.

Требуемые значения длин гидроцилиндров будут определяться выражениями

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{11} + v_c t; l_2 = l_{21} + v_c t; \\ l_3 &= l_{31} + v_c t; l_4 = l_{41} + v_c t, \end{aligned}$$

где v_c — постоянная (максимально возможная одинаковая скорость выдвигания штоков всех гидроцилиндров).

Условие завершения второго этапа:

$$R_{\Sigma} \geq 0,9G_0,$$

где $R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

При завершении второго этапа, т. е. при выполнении последнего условия, запоминаются текущие значения длин всех гидроцилиндров: $l_{12}, l_{22}, l_{32}, l_{42}$.

После второго этапа начинает выполняться третий этап.

◆ *Третий этап.* Штоки всех гидроцилиндров дополнительно выдвигают на одинаковую величину, составляющую определенную долю от максимального предельного значения длин гидравлических опор (порядка 5 %, определяется конструктив-

но). Этап обеспечивает вывешивание платформы, т. е. отрыв от грунта всех пневмоколес, расположенных под платформой.

Требуемые значения длин гидроцилиндров будут определяться выражениями

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{12} + v_c t; l_2 = l_{22} + v_c t; \\ l_3 &= l_{32} + v_c t; l_4 = l_{42} + v_c t. \end{aligned}$$

Условие завершения третьего этапа:

$$t \geq t_{\text{пред}},$$

где $t_{\text{пред}}$ — предельное время.

При завершении третьего этапа, т. е. при выполнении последнего условия, запоминаются текущие значения длин всех гидроцилиндров: $l_{1\min}, l_{2\min}, l_{3\min}, l_{4\min}$. Это будут минимальные предельные значения длин гидравлических опор для четвертого этапа (см. рис. 2).

После третьего этапа начинает выполняться четвертый этап. Первые три этапа выполняются однократно.

◆ *Четвертый этап.* Он заключается в коррекции углов наклона платформы в двух диагональных вертикальных плоскостях независимо друг от друга, с одновременным смещением штоков всех четырех опор из начального положения в положение, соответствующее оптимальному сочетанию значений запасов ходов штоков гидроцилиндров на подъем и на опускание платформы. Условие в виде булевой функции, выполнение которого должно быть обеспечено, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} & (-\Delta\alpha \leq \alpha_x \leq \Delta\alpha) \wedge (-\Delta\alpha \leq \alpha_y \leq \Delta\alpha) \wedge \\ & \wedge (s_u - \Delta l \leq s_d \leq s_u + \Delta l) \wedge (l_{1\min} \leq l_1 \leq l_{1\max}) \wedge \\ & \wedge (l_{2\min} \leq l_2 \leq l_{2\max}) \wedge (l_{3\min} \leq l_3 \leq l_{3\max}) \wedge \\ & \wedge (l_{4\min} \leq l_4 \leq l_{4\max}), \end{aligned}$$

где $\Delta\alpha$ — допустимая угловая погрешность для углов наклона платформы; Δl — допустимая линейная погрешность для длин гидроцилиндров.

Для расчетов необходимы начальные значения длин гидроцилиндров $l_{14н}, l_{24н}, l_{34н}, l_{44н}$, которые однократно измеряются в начале четвертого этапа. Если этот этап выполняется впервые, значения $l_{14н}, l_{24н}, l_{34н}, l_{44н}$ и $l_{1\min}, l_{2\min}, l_{3\min}, l_{4\min}$ соответственно будут совпадать. В противном случае они будут различными.

Коррекция диагональных углов наклона α_x и α_y при условии сохранения контакта с грунтом всех четырех опор должна осуществляться путем одновременного выдвигания штока одного диагонального гидроцилиндра и втягивания штока противоположного диагонального гидроцилиндра на одну и ту же величину. Суммарные перемещения штоков двух пар диагональных гидроцилиндров Δz_{13} и Δz_{24} при этом будут равны соответственно:

$$\Delta z_{13} = l_d \operatorname{tg} \alpha_x; \Delta z_{24} = l_d \operatorname{tg} \alpha_y.$$

Перемещения штоков каждой из опор, необходимые для коррекции углов, будут равны

$$\begin{aligned} \delta l_1 &= (\operatorname{tg}\alpha_x)l_d/2; \delta l_3 = -(\operatorname{tg}\alpha_x)l_d/2; \\ \delta l_2 &= -(\operatorname{tg}\alpha_y)l_d/2; \delta l_4 = (\operatorname{tg}\alpha_y)l_d/2. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения углов наклона платформы α_x и α_y однократно определяются в начале четвертого этапа.

Кроме горизонтирования необходимо смещение штоков всех четырех опор в положение, соответствующее оптимальному сочетанию значений запасов ходов штоков гидроцилиндров на подъем s_u и на опускание s_d платформы, что требует выполнения условия $s_d \approx s_u$. Учитывая, что (см. рис. 3)

$$s_u = \min[(l_{\max} - l_{1\text{опт}}), (l_{\max} - l_{2\text{опт}}), (l_{\max} - l_{3\text{опт}}), (l_{\max} - l_{4\text{опт}})]; \quad (4)$$

$$s_d = \min[(l_{1\text{опт}} - l_{1\text{мин}}), (l_{2\text{опт}} - l_{2\text{мин}}), (l_{3\text{опт}} - l_{3\text{мин}}), (l_{4\text{опт}} - l_{4\text{мин}})],$$

для достижения оптимального положения штоков всех опор, предварительно должны быть определены номера двух опор: 1) наиболее приближенной к положению максимальной предельной длины l_{\max} (обозначим номер данной опоры u); 2) наиболее приближенной к положению минимальной предельной длины соответствующей опоры (обозначим номер данной опоры d).

Номера u и d — это порядковые номера опор с промежуточными переменными L_u и L_d соответственно. Значения величин L_u и L_d определяются по начальным значениям длин опор $l_{14н}$, $l_{24н}$, $l_{34н}$, $l_{44н}$ на данном этапе и по соответствующим значениям корректирующих углы наклона перемещений δl_1 , δl_2 , δl_3 , δl_4 , определенным по (3) путем их подстановки в (4):

$$L_u = \min[(l_{\max} - l_{14н} - \delta l_1)(l_{\max} - l_{24н} - \delta l_2) \times (l_{\max} - l_{34н} - \delta l_3)(l_{\max} - l_{44н} - \delta l_4)]; \quad (5)$$

$$L_d = \min[(l_{14н} + \delta l_1 - l_{1\text{мин}})(l_{24н} + \delta l_2 - l_{2\text{мин}}) \times (l_{34н} + \delta l_3 - l_{3\text{мин}})(l_{44н} + \delta l_4 - l_{4\text{мин}})].$$

Также определяются соотношения между длинами опор $(l_{14н} + \delta l_1)$, $(l_{24н} + \delta l_2)$, $(l_{34н} + \delta l_3)$, $(l_{44н} + \delta l_4)$ для случая горизонтирования платформы без какого-либо смещения ее вверх или вниз из начального положения:

$$c_{12} = (l_{14н} + \delta l_1) - (l_{24н} + \delta l_2);$$

$$c_{13} = (l_{14н} + \delta l_1) - (l_{34н} + \delta l_3);$$

$$c_{14} = (l_{14н} + \delta l_1) - (l_{44н} + \delta l_4);$$

$$c_{21} = -c_{12}; c_{23} = c_{13} - c_{12}; c_{24} = c_{14} - c_{12};$$

$$c_{31} = -c_{13}; c_{32} = -c_{23}; c_{34} = c_{14} - c_{13};$$

$$c_{41} = -c_{14}; c_{42} = -c_{24}; c_{43} = -c_{34}.$$

Эти соотношения не изменятся и после смещения штоков всех четырех опор в оптимальное по запасам ходов положение:

$$\begin{aligned} l_{1\text{опт}} &= c_{12} + l_{2\text{опт}}; l_{1\text{опт}} = c_{13} + l_{3\text{опт}}; \\ l_{1\text{опт}} &= c_{14} + l_{4\text{опт}}; \\ l_{2\text{опт}} &= c_{21} + l_{1\text{опт}}; l_{2\text{опт}} = c_{23} + l_{3\text{опт}}; \\ l_{2\text{опт}} &= c_{24} + l_{4\text{опт}}; \\ l_{3\text{опт}} &= c_{31} + l_{1\text{опт}}; l_{3\text{опт}} = c_{32} + l_{2\text{опт}}; \\ l_{3\text{опт}} &= c_{34} + l_{4\text{опт}}; \\ l_{4\text{опт}} &= c_{41} + l_{1\text{опт}}; l_{4\text{опт}} = c_{42} + l_{2\text{опт}}; \\ l_{4\text{опт}} &= c_{43} + l_{3\text{опт}}, \end{aligned} \quad (6)$$

поэтому после нахождения номеров u и d по (5) получим систему из двух уравнений с двумя неизвестными $l_{u\text{опт}}$ и $l_{d\text{опт}}$:

$$\begin{cases} l_{\max} - l_{u\text{опт}} = l_{d\text{опт}} - l_{d\text{мин}}; \\ l_{u\text{опт}} - l_{d\text{опт}} = c_{ud}. \end{cases}$$

Ее решение имеет вид:

$$l_{d\text{опт}} = (l_{\max} - c_{ud} + l_{d\text{мин}})/2; l_{u\text{опт}} = c_{ud} + l_{d\text{опт}}.$$

Затем по (6) могут быть определены оптимальные длины остальных опор, в результате получим четыре значения: $l_{1\text{опт}}$, $l_{2\text{опт}}$, $l_{3\text{опт}}$, $l_{4\text{опт}}$.

Располагая начальными значениями $l_{14н}$, $l_{24н}$, $l_{34н}$, $l_{44н}$ и соответствующими оптимальными (целевыми) значениями длин опор $l_{1\text{опт}}$, $l_{2\text{опт}}$, $l_{3\text{опт}}$, $l_{4\text{опт}}$, определим скорости движения опор на четвертом этапе при условии перемещения каждой опоры из начального положения в целевое за одну секунду:

$$v_{1\text{сек}} = (l_{1\text{опт}} - l_{14н})/1; v_{2\text{сек}} = (l_{2\text{опт}} - l_{24н})/1;$$

$$v_{3\text{сек}} = (l_{3\text{опт}} - l_{34н})/1; v_{4\text{сек}} = (l_{4\text{опт}} - l_{44н})/1.$$

Определим скорость опоры, шток которой будет при этом двигаться из начального положения в оптимальное с наибольшей скоростью:

$$v_{\text{хсек}} = \max[|v_{1\text{сек}}|, |v_{2\text{сек}}|, |v_{3\text{сек}}|, |v_{4\text{сек}}|].$$

Располагая предельным (определяемым конструкцией гидропривода) значением скорости движения штока каждого гидроцилиндра $v_{\text{пред}}$, определим коэффициент масштабирования скоростей k_v :

$$k_v = v_{\text{пред}}/|v_{\text{хсек}}|.$$

Тогда требуемые скорости движения штоков будут равны

$$v_1 = k_v v_{1\text{сек}}; v_2 = k_v v_{2\text{сек}}; v_3 = k_v v_{3\text{сек}}; v_4 = k_v v_{4\text{сек}}.$$

Таким образом, требуемые значения длин гидроцилиндров на четвертом этапе будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{14н} + v_1 t; l_2 = l_{24н} + v_2 t; l_3 = l_{34н} + v_3 t; \\ l_4 &= l_{44н} + v_4 t. \end{aligned}$$

Движение штока каждой из опор останавливается независимо от других до или во время завершения четвертого этапа при выполнении соответствующего условия:

$$\begin{aligned} (l_{1\text{опт}} - \Delta l \leq l_1 \leq l_{1\text{опт}} + \Delta l); \\ (l_{2\text{опт}} - \Delta l \leq l_2 \leq l_{2\text{опт}} + \Delta l); \\ (l_{3\text{опт}} - \Delta l \leq l_3 \leq l_{3\text{опт}} + \Delta l); \\ (l_{4\text{опт}} - \Delta l \leq l_4 \leq l_{4\text{опт}} + \Delta l). \end{aligned}$$

Четвертый этап завершается по любому из двух условий в виде булевых функций:

$$\begin{aligned} (l_{1\text{опт}} - \Delta l \leq l_1 \leq l_{1\text{опт}} + \Delta l) \wedge \\ \wedge (l_{2\text{опт}} - \Delta l \leq l_2 \leq l_{2\text{опт}} + \Delta l) \wedge \\ \wedge (l_{3\text{опт}} - \Delta l \leq l_3 \leq l_{3\text{опт}} + \Delta l) \wedge \\ \wedge (l_{4\text{опт}} - \Delta l \leq l_4 \leq l_{4\text{опт}} + \Delta l); \end{aligned} \quad (7)$$

$$(R_1 \leq \Delta R) | (R_2 \leq \Delta R) | (R_3 \leq \Delta R) | (R_4 \leq \Delta R), \quad (8)$$

где $|$ — знак операции логического сложения (дизъюнкция).

Условие (7) означает достижение оптимального положения штоков и вызывает переход к пятому этапу. Условие (8) означает отрыв одной или нескольких опор от грунта и вызывает переход к шестому этапу.

◆ *Пятый этап.* Выполняется перераспределение нагрузки между опорами машины в целях повышения равномерности загрузки опор и предотвращения отрыва опор от грунта при проседании последнего.

В начале пятого этапа однократно для данного этапа определяются номер опоры r с минимальным значением силы реакции, определенной по (1):

$$R_r = \min[R_1 R_2 R_3 R_4] \text{ при } t = 0$$

и начальная длина гидроцилиндра данной опоры $l_{r5н}$.

Введем новую переменную $R_{\min r}$ — минимальную силу реакции из множества всех реакций опор за исключением опоры r :

$$R_{\min r} = \min[\{R_1 R_2 R_3 R_4\} \setminus \{R_r\}].$$

Значение скорости перемещения штока опоры r на пятом этапе будет определяться выражением:

$$v_r = \begin{cases} v_{\min}, & \text{если } R_r < (R_{\min r} - \Delta R); \\ 0, & \text{если } (R_{\min r} - \Delta R) \leq R_r \leq (R_{\min r} + \Delta R); \\ -v_{\min}, & \text{если } R_r > (R_{\min r} + \Delta R). \end{cases}$$

Здесь v_{\min} — определенная минимальная скорость движения штока гидроцилиндра, обеспечиваемая гидроприводом машины. Положительным значениям соответствует выдвижение штока.

Требуемое значение длины гидроцилиндра опоры r на пятом этапе будет определяться выражением

$$l_r = l_{r5н} + v_{\min} t.$$

Пятый этап завершается по любому из двух условий — (8) или следующему:

$$(R_{\min r} - \Delta R) \leq R_r \leq (R_{\min r} + \Delta R).$$

Последнее условие означает достижение оптимального соотношения сил реакций опор и вызывает переход к четвертому этапу. Условие (8) означает отрыв одной или нескольких опор от грунта и вызывает переход к шестому этапу.

В нормальных условиях работы, после горизонтирования платформы и приведения ее в оптимальное по высоте положение, четвертый и пятый этапы будут постоянно чередоваться между собой.

◆ *Шестой этап.* Аварийное состояние машины, при котором произошел отрыв одной или нескольких опор от грунта вследствие его проседания. Выключается рабочее оборудование, происходит выдвижение оторванных от грунта опор с максимальной скоростью до достижения их контакта с грунтом.

В начале этапа однократно определяются начальные значения сил нормальных реакций на всех опорах машины $R_{15н}, R_{25н}, R_{35н}, R_{45н}$ по (1) и однократно измеряются длины всех гидравлических опор $l_{15н}, l_{25н}, l_{35н}, l_{45н}$.

Значения скоростей перемещения каждого штока v_1, v_2, v_3, v_4 на шестом этапе будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned} v_1 &= \begin{cases} (R_{\min 1} - R_1)k & \text{при } R_{15н} \leq \Delta R; \\ 0 & \text{при } R_{15н} > \Delta R; \end{cases} \\ v_2 &= \begin{cases} (R_{\min 2} - R_2)k & \text{при } R_{25н} \leq \Delta R; \\ 0 & \text{при } R_{25н} > \Delta R; \end{cases} \\ v_3 &= \begin{cases} (R_{\min 3} - R_3)k & \text{при } R_{35н} \leq \Delta R; \\ 0 & \text{при } R_{35н} > \Delta R; \end{cases} \\ v_4 &= \begin{cases} (R_{\min 4} - R_4)k & \text{при } R_{45н} \leq \Delta R; \\ 0 & \text{при } R_{45н} > \Delta R. \end{cases} \end{aligned}$$

Требуемые значения длин гидравлических опор будут определяться выражениями

$$\begin{aligned} l_1 &= l_{15н} + v_1 t; \quad l_2 = l_{25н} + v_2 t; \\ l_3 &= l_{35н} + v_3 t; \quad l_4 = l_{45н} + v_4 t, \end{aligned}$$

где t — время, отсчитываемое с начала этапа.

Шестой этап заканчивается, когда силы реакций на всех опорах превысят значения, близкие к R_{\min} :

$$\begin{aligned} (R_1 \geq R_{\min 1} - \Delta R) \wedge (R_2 \geq R_{\min 2} - \Delta R) \wedge \\ \wedge (R_3 \geq R_{\min 3} - \Delta R) \wedge (R_4 \geq R_{\min 4} - \Delta R), \end{aligned}$$

где ΔR — допустимая погрешность силы реакции.

После завершения шестого этапа выполняется четвертый этап. Завершение работы всего алгоритма возможно во время выполнения четвертого и пятого этапов при подаче сигнала оператором на

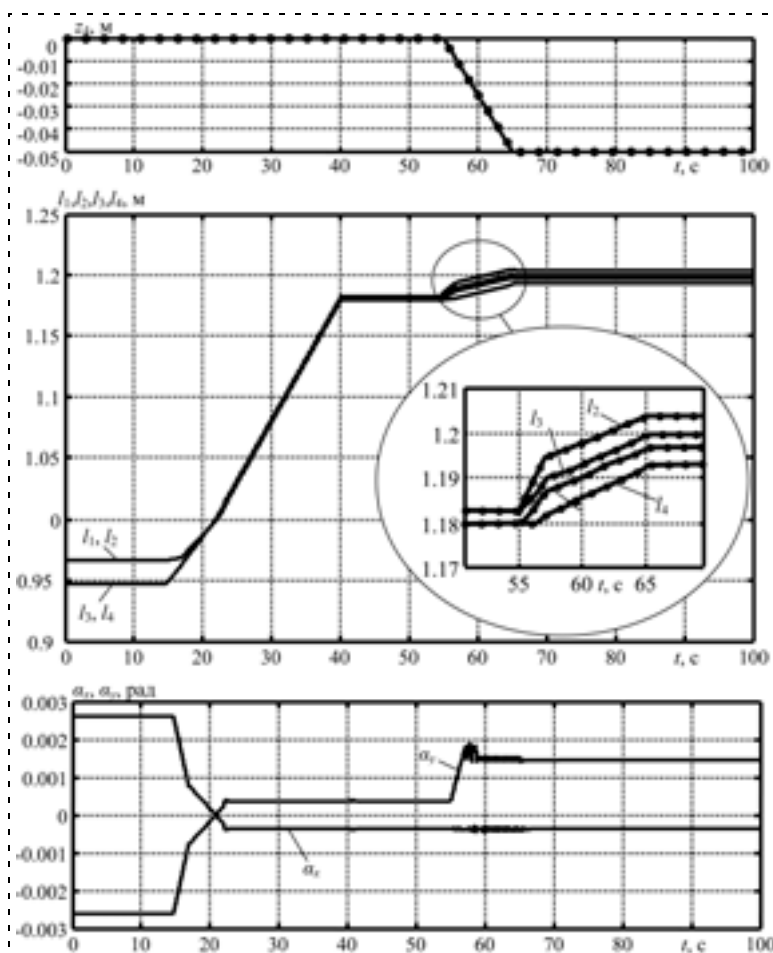


Рис. 5. Временные зависимости вертикальной координаты грунта z_4 под опорой № 4, длин четырех опор l_1, l_2, l_3, l_4 и углов наклона диагоналей платформы α_x, α_y (пример моделирования)

завершение работы и снятие машины с выносных опор.

Результаты цифрового моделирования системы автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины

Для подтверждения адекватности предложенного алгоритма была осуществлена его программная и модельная реализация в системе MatLab. В качестве примера, подтверждающего работоспособность синтезированного алгоритма, на рис. 5 приведены временные зависимости вертикальной координаты грунта z_4 под опорой № 4, длин четырех опор l_1, l_2, l_3, l_4 и углов наклона диагоналей платформы α_x, α_y . Моделировалась ситуация вывешивания платформы на опорах, и последующего проседания грунта под одной из опор (№ 4) на

0,05 м в течение 10 с (с 55 до 65 с времени моделирования). Допустимая угловая погрешность для углов наклона платформы $\Delta\alpha$ в данном примере принималась равной 0,00174532 рад ($0,1^\circ$). Из зависимостей на рис. 5 видно, что после вывешивания платформы ($t \approx 20$ с) абсолютные значения углов наклона диагоналей платформы α_x, α_y все время находятся в пределах, не превышающих $\Delta\alpha$.

Заключение. Главным отличительным признаком алгоритма является использование углов наклона диагоналей платформы. Этим обеспечивается независимое одновременное горизонтирование платформы в двух ее диагональных плоскостях, причем возможно горизонтирование одновременным выдвиганием одной диагональной опоры и втягиванием другой, что ускоряет процесс. Контроль длин опор обеспечивает возможность поддержания опорной платформы на заданной высоте и повышает запас управляемости углами наклона платформы. Вычисление усилий на опорах по давлениям гидрожидкости позволяет предотвратить внештатные ситуации отрыва опор от грунта и потери устойчивости при проседании грунта под какой-либо из опор.

Список литературы

1. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов и кранов-манипуляторов: ПБ 10-382—00 и ПБ 10-257—98. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. 335 с.
2. **Котельников В. С.** Комментарий к правилам устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-382—00) / В. С. Котельников, Н. А. Шишков. М.: МЦФЭР, 2007. 720 с.
3. **Правила** техники безопасности при эксплуатации стреловых самоходных кранов: ВСН 274—88. М.: СтройИнфо, 2007. 22 с.
4. **Раннев А. В., Корелин В. Ф., Жаворонков А. В.** Строительные машины: Справочник: В 2 т. Т. 1: Машины для строительства промышленных, гражданских сооружений и дорог / Под общ. ред. Э. Н. Кузина. М.: Машиностроение, 1991. 496 с.
5. **Пат. 2196893** Российская Федерация, МПК E 21 B 44/00, E 21 B 7/02. Способ автоматического горизонтирования несущей платформы с буровым агрегатом и устройство для его реализации / Сидоров И. А., Чухлебов В. Н. № 2001111382/03; заявл. 24.04.01; опубл. 20.01.03, Бюл. № 2. 2 с.
6. **Пат. 2342310** Российская Федерация, МПК В 66 С 5/00, В 66 С 23/78. Устройство автоматического выравнивания опорной платформы / Великанов А. В., Иванищев П. И., Танчук П. В., Нилов В. А. № 2007115362/11; заявл. 23.04.07; опубл. 27.12.08, Бюл. № 36. 5 с.



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 7 (112)
ИЮЛЬ
2010

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

- Лебедев Г. Н., Матвеев М. Г., Михайлов В. В., Семенов М. Е.**
Управление авиационной системой, находящейся под стохастическим влиянием метеофакторов 65
- Борисенко Ю. Г., Володина Л. А., Касьянов И. Ю., Кузнецов А. Г.**
Основные принципы унифицированного построения трактов автоматического управления полетом самолета на режиме "Уход на 2-й круг" 69
- Кербер О. Б., Мазур В. Н., Цатурян К. Т.**
Особенности автоматизации посадки самолетов гражданской авиации по категории III ICAO 76

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,
Московский авиационный институт
(технический университет),

М. Г. Матвеев, д-р техн. наук, проф.,
зам. директора,

Российская академия государственной службы
при президенте РФ (Воронежский филиал),
mgmatveev@yandex.ru,

В. В. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,
нач. факультета,

М. Е. Семенов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Воронежский военный авиационный
инженерный университет
mkl150@mail.ru

Управление авиационной системой, находящейся под стохастическим влиянием метеофакторов

Приводится методика решения задачи оптимального управления авиационными системами, функционирующими в условиях стохастического влияния метеофакторов.

Ключевые слова: оптимальное управление, метеорология, авиационные системы, теория принятия решений

Введение

Проблемы повышения качества управления открытой авиационной системой (АС) в условиях стохастического влияния ряда внешних факторов является важной, нерешенной к настоящему времени задачей [1–3]. Функционирование указанной системы, как правило, является многошаговым, повышение его эффективности требует решения оптимизационной динамической задачи управления в условиях неопределенности. Классические модели оптимизации обычно основаны на использовании информации об экономической составляющей качества управления. Однако при решении ряда задач эти показатели играют второстепенную роль. Например, функционирование военной авиации, как правило, не преследует цели получения максимальной прибыли. Следовательно, экономические критерии в этом случае не могут быть положены в основу построения оптимизационных моделей. Разработке и исследованию методов решения оптимизационной стохастической задачи управления АС посвящена данная статья.

Постановка задачи

В общем случае динамическая задача оптимального управления АС сводится к решению уравне-

ния Беллмана [4], которое представляет собой рекуррентное соотношение, обеспечивающее последовательную оптимизацию управления на каждом этапе управляемого процесса:

$$J_t^k(y_{T-t}^k) = \operatorname{opt}_{x_{T-t}^k} [F(y_{T-t}^k, x_{T-t}^k) + J_{t-1}^k(y_{T-(t+1)}^k)], \forall t = \overline{1, T}, \quad (1)$$

где T — число этапов; t — число этапов до конца процесса управления; J_t^k и J_{t-1}^k — оптимальные выигрыши на соответствующих этапах; y_{T-t}^k , $y_{T-(t+1)}^k$ — векторы состояния АС на соответствующих этапах; x_{T-t}^k — вектор управляющих воздействий (принятия решений) и $F(y_{T-t}^k, x_{T-t}^k)$ — выигрыш на $(T-t)$ -м этапе.

В соотношении (1) индекс k указывает на k -ю стратегию использования стохастической информации [3, 2]. Применение множества таких стратегий обеспечивает множество вариантов решения динамической задачи оптимального управления (1). Методика выбора наилучшей стратегии и построения на базе этой стратегии наилучшего вектора $x^{\text{опт}}$, которое обеспечивает, по сути, решение стохастической задачи динамического программирования, требует отдельного рассмотрения.

Методика решения поставленной задачи

Построение методики осуществляется на базе использования дополнительной статистической информации о соответствии принимаемых решений и эффективности функционирования АС. Эта информация может быть получена с помощью анализа показателей относительной верификации γ^k и ω^k , рассчитанных на базе архивной информации о критерии J . При решении оптимизационной задачи показатели определим по формулам, предложенным в работе [2]:

$$\gamma^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{J_i(y^k) - J_i(y^3)}{J_i(y^3)}; \quad (2)$$

$$\omega^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{J_i(y^k) - J_i(y^3)}{J_i(y^k) - J_i(y^3)}, \forall k = \overline{1, K},$$

где N — объем выборки; K — число стратегий использования стохастической информации; y^k , y^3 , y^u — параметры состояния АС по окончании ее функционирования, связанные соответственно с k -й, эмпирической, основанной на опыте и интуиции лица, принимающего решение, и идеальной стратегиями использования стохастической информации [2].

Таким образом, основное содержание методики решения задачи динамического программирования при управлении АС сводится к следующему.

1. С помощью рекуррентного соотношения (1) для всех этапов функционирования АС и стратегий использования стохастической информации разрабатывается множество вариантов плана функционирования АС.

2. С помощью соотношений (2) выбирается план, обеспечивающий максимум показателей γ^k и ω^k .

3. На основе анализа значений показателей γ^k и ω^k делается вывод об эффективности наилучшего вектора $x^{\text{опт}}$ принятия решений и перспективах ее увеличения.

Отличительная особенность данной методики состоит в том, что ее применение позволяет свести решение стохастической динамической задачи управления к решению соответствующей задачи с детерминированными параметрами, что способствует повышению устойчивости и улучшению интерпретации полученных результатов.

Модели принятия решений

Апробирование разработанной методики осуществлено на примере построения моделей принятия решений при управлении АС, когда стохастическая составляющая влияющих факторов обусловлена метеорологической неопределенностью. При этом цель управления заключается в обеспечении оптимального выполнения ряда элементарных задач (ЭЗ) на последовательных этапах функционирования АС, особенностью которого состоит в отсутствии требований, определяющих необходимость выполнения конкретных ЭЗ на конкретных этапах. В то же время важным лимитирующим фактором является необходимость выполнения всей программы в определенный временной период. Постановка задачи построения моделей принятия решений при управлении АС в указанных условиях заключается в следующем.

Для выполнения программы, решающей M ЭЗ, имеются ограниченные ресурсы, обеспечивающие возможность выполнения N ЭЗ за T этапов (дней), причем на каждом этапе можно выполнить лишь одну ЭЗ. Если метеоусловия не соответствуют установленным требованиям, то ЭЗ выполнена быть не может. Необходимо построить динамические модели принятия решений по поэтапному функционированию АС в условиях метеонеопределенности, обеспечивающему максимум вероятности

$P_{M, N, T}^k$ выполнения всей программы.

Построение указанных моделей предлагается осуществить с учетом анализа результатов прогноза выполнения программы функционирования АС по влияющим метеофакторам. В качестве предикторов таких прогнозов предлагается принять вероятностные характеристики качества стратегий ис-

пользования метеоинформации и показатели, учитывающие влияние метеоусловий на возможность выполнения ЭЗ. В этом случае вероятность

$P_{M, N, T}^k$ выполнения всей программы определим с помощью рекуррентных соотношений:

$$P_{M, N, T}^k = \begin{cases} p_T^k + P_{M-1, N-1, T-1}^k (1 - p_T^k) \\ \text{при } m = M-1, n = N-1, t = T-1; \\ (p_T^{*k} - p_T^k) + P_{M, N-1, T-1}^k (1 - \\ - (p_T^{*k} - p_T^k)) \text{ при } m = M, \\ n = N-1, t = T-1; \\ 1 - p_T^{*k} (1 - P_{M, N, T-1}^k) \\ \text{при } m = M, n = N, t = T-1 \end{cases} \quad (3)$$

при условиях

$$P_{M, N, T}^k = 1 \quad \forall N \text{ и } T \text{ при } M = 0; \quad (4)$$

$$P_{M, N, T}^k = 0 \quad \forall N < M \text{ или } T < M,$$

где p_T^k — вероятность выполнения ЭЗ при прогнозе благоприятных метеоусловий с помощью k -й стратегии; p_T^{*k} — вероятность принятия решения на выполнение ЭЗ; m, n, t — число оставшихся ЭЗ, ресурсов и этапов соответственно.

Указанные вероятности рассчитываются по формулам

$$\int_{p_{0T}^k}^1 f^k(\tilde{p}_T^k) p_T^{*k} d\tilde{p}_T^k = p_T^k, \quad \int_{p_{0T}^k}^1 f^k(\tilde{p}_T^k) d\tilde{p}_T^k = p_T^{*k}, \quad (5)$$

где p_{0T}^k — пороговая вероятность выполнения ЭЗ;

$f^k(\tilde{p}_T^k)$ — плотность распределения вероятности \tilde{p}_T^k

принятия решения; p_T^{*k} — условная вероятность выполнения ЭЗ при прогнозе благоприятных метеоусловий.

Из выражений (3)—(5) следует, что состояние АС, определяемое величинами m, n, t , может меняться при появлении одного из трех событий:

- при прогнозе благоприятных метеоусловий принимается решение на выполнение ЭЗ, и она выполняется;
- при прогнозе благоприятных метеоусловий принимается решение на выполнение ЭЗ, и она не выполняется вследствие неоправдываемости метеопрогноза;
- при прогнозе неблагоприятных метеоусловий принимается решение на невыполнение ЭЗ.

Данные события представляют собой полную группу несовместных событий. В процессе функционирования АС возможен случай выполнения ЭЗ, когда прогноз неблагоприятных метеоусловий не оправдывается. Однако вероятность реализации такого случая в работе минимизируется выбором порога p_{0T}^k , зависящего от выбранной процедуры управления. Например, если цена выполнения ЭЗ не играет решающей роли, то значение пороговой вероятности p_{0T}^k можно снизить, повысив уровень риска и вероятность выполнения ЭЗ. В рассматриваемой постановке, требующей максимизации вероятности $P_{M,N,T}^k$, задача управления предусматривает именно такую процедуру.

Необходимые рекомендации на каждом этапе предлагается разрабатывать путем сравнения значений пороговой вероятности p_{0T}^k и вероятности $P_{M,N,T}^k$. В случае, если $P_{M,N,T}^k \geq p_{0T}^k$, принимается решение на выполнение ЭЗ, в противном случае — на невыполнение. Величину p_{0T}^k перед каждым этапом функционирования АС следует определять из условия

$$P_{M,N,T}^k(p_{0T}^k) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Выбор наилучшей стратегии осуществляется по максимуму показателей γ^k , ω^k , рассчитанных с помощью соотношений (2).

На практике часто возникает проблема аналитического описания применяемых в выражениях (3)—(6) характеристик, что вызывает необходимость представления этих характеристик в дискретном виде. С этой целью по результатам статистического анализа данных сопряженности принимаемых решений с фактическими метеоусловиями для каждой стратегии использования метеоинформации необходимо определить оценки \hat{p}^{rk} и \hat{p}^{*rk} соответствующих вероятностей. Эти оценки будут приведены ниже.

Применение полученных оценок дает возможность преобразования рекуррентных соотношений (3):

$$P_{M,N,T}^k = \begin{cases} \hat{p}^{*k} \hat{p}^{rk} + P_{M-1,N-1,T-1}^k (1 - \hat{p}^{*k} \hat{p}^{rk}) \\ \text{при } m = M-1, n = N-1, t = T-1; \\ \hat{p}^{*k} (1 - \hat{p}^{rk}) + P_{M,N-1,T-1}^k (1 - \\ - (\hat{p}^{*k} (1 - \hat{p}^{rk}))) \text{ при } m = M, \\ n = N-1, t = T-1; \\ 1 - \hat{p}^{*k} (1 - P_{M,N,T-1}^k) \\ \text{при } m = M, n = N, t = T-1. \end{cases} \quad (7)$$

Если в АС имеется R летательных аппаратов (ЛА), и один из них на каждом этапе может выполнить только одну ЭЗ, то вероятность $G_{M,N,T}^k$ выполнения программы функционирования АС определяется рекуррентными соотношениями:

$$G_{M,N,T}^k = \begin{cases} p_T^{rk} + G_{M-r,N-r,T-1}^k (1 - p_T^{rk}) \\ \text{при } m = M-r, n = N-r, t = T-1; \\ (p_T^{*rk} - p_T^{rk}) + G_{M,N-r,T-1}^k (1 - \\ - (p_T^{*rk} - p_T^{rk})) \text{ при } m = M, \\ n = N-r, t = T-1; \\ 1 - p_T^{*rk} (1 - G_{M,N,T-1}^k) \\ \text{при } m = M, n = N, t = T-1 \end{cases} \quad (8)$$

при условиях

$$G_{M,N,T}^k = 1 \quad \forall N \text{ и } T \text{ при } M = 0; \quad (9)$$

$$G_{M,N,T}^k = 0 \quad \forall N < M \text{ или } T < M/R,$$

$$\text{где } p_T^{rk} = \int_{p_{0T}^{rk}}^{p_{0T}^{(r+1)k}} f^k(\tilde{p}^{rk}) p^{rk} d\tilde{p}^{rk};$$

$$p_T^{*rk} = \int_{p_{0T}^{rk}}^{p_{0T}^{(r+1)k}} f^k(\tilde{p}^{rk}) d\tilde{p}^{rk}, \quad \forall r = \overline{1, R}, k = \overline{1, K}.$$

Величину p_{0T}^{rk} перед каждым этапом функционирования АС, как и ранее, предлагается определять из условия

$$G_{M,N,T}^k(p_{0T}^{rk}) \rightarrow \max. \quad (10)$$

При дискретном распределении вектора-предиктора соотношения (8) принимают вид

$$G_{M,N,T}^k = \begin{cases} \hat{p}^{*rk} \hat{p}^{rk} + G_{M-1,N-1,T-1}^k (1 - \hat{p}^{*rk} \hat{p}^{rk}) \\ \text{при } m = M-1, n = N-1, t = T-1; \\ \hat{p}^{*rk} (1 - \hat{p}^{rk}) + G_{M,N-1,T-1}^k (1 - \\ - (\hat{p}^{*rk} (1 - \hat{p}^{rk}))) \text{ при } m = M, \\ n = N-1, t = T-1; \\ 1 - \hat{p}^{*rk} (1 - G_{M,N,T-1}^k) \\ \text{при } m = M, n = N, t = T-1. \end{cases} \quad (11)$$

Оценки вероятностей \hat{p}^{*rk} , \hat{p}^{rk} ($r = \overline{1, R}$, $k = \overline{1, K}$) в этом соотношении определяются по

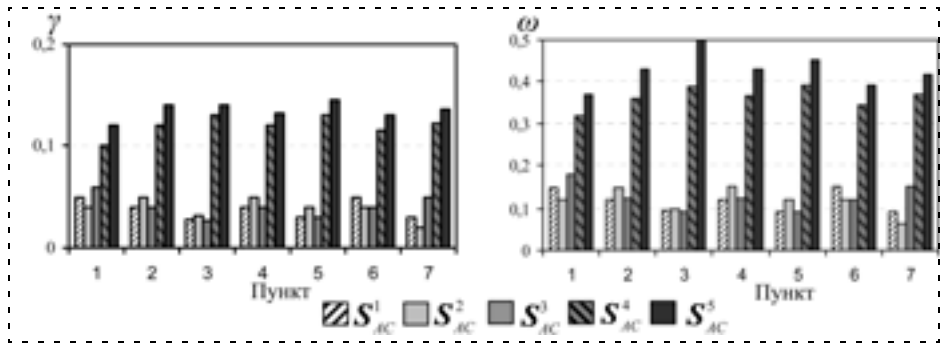
данным, представленным в табл. 1 с помощью выражений

$$\hat{p}^{rk} = \frac{n_{1r}}{\sum_i n_{ir}}, \hat{p}^{*rk} = \frac{\sum_i n_{ir}}{\sum_{ij} n_{ij}}. \quad (12)$$

Здесь индекс i отвечает соответствующим метеоусловиям, r — номер ЛА.

Пороговая вероятность определяется для каждого этапа выполнения программы. Изменение параметров на предыдущем этапе, как правило, вызывает изменение решения на текущем этапе и, соответственно, общий выигрыш. Здесь необходимо отметить, что алгоритм решения поставленной задачи реализуется с последнего этапа, т. е. сначала определяется условный максимальный выигрыш и соответствующее ему оптимальное решение на последнем этапе, а затем оптимизируются все решения на предшествующих этапах.

Для получения числовых значений оценок \hat{p}^{rk} , \hat{p}^{*rk} , \hat{p}^{*rk} была сформирована архивная выборка, составленная по семи пунктам (Киров, Нижний Новгород, Москва, Волгоград, Воронеж, Ростов-на-Дону, Астрахань), за период с 1979 по 2008 год. В качестве влияющих метеофакторов рассматривали высоту нижней границы облаков (ВНГО) и грозное положение в районе выполнения ЭЗ. Прогноз ВНГО осуществляли с помощью



Диаграммы зависимостей показателей γ и ω от стратегий S_{AC}^k

известных методов Е. И. Гоголевой и З. А. Спарышкиной [3], а также с помощью уравнений регрессии. Для прогноза грозного положения использовали методы Вайтинга, Фауста, Фатеева и Шоултера [3], а также метод, основанный на применении искусственных нейронных сетей (ИНС) [5, 6]. В одном случае и прогноз ВНГО, и прогноз грозного положения разрабатывали без учета прогностической информации об атмосферной турбулентности, полученной с помощью разработанного в работе [4] прогностического метода, основанного на оценке фрактальных свойств атмосферной турбулентности, в другом — с учетом указанной информации.

Различные сочетания используемых методов прогноза ВНГО и грозного положения формируют множество стратегий $\{S_{AC}^k\}$ использования метеорологической информации [7]. В табл. 2 приведены пять из них, наиболее контрастные по критерию эффективности функционирования АС. В данной таблице звездочкой обозначены методы, применяемые совместно с методом прогноза АТ, построенным путем модификации метода Херста [4].

Результатом любой из рассматриваемых стратегий является определенный вариант решения поставленной задачи. Наилучшую стратегию использования метеоинформации и эффективность применения исследуемых моделей определяли путем анализа показателей γ^k , ω^k , рассчитанных по соотношениям (2). На рисунке представлены диаграммы зависимостей показателей γ и ω от стратегий S_{AC}^k . Анализ этих диаграмм показывает, что применение построенных моделей принятия решений обеспечивает существенное повышение эффективности функционирования АС. Так, применение стратегий $S_{AC}^1 - S_{AC}^3$ приводит к незначительному положительному эффекту. Стратегии же S_{AC}^4 и S_{AC}^5 обеспечивают увеличение показателя γ на 12...15 %, а показателя ω — на 35...50 %.

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что при любых M , N , T вероятность выполнения заданной программы при использовании

Таблица 1

Сопряженность между принимаемыми решениями на выполнение ЭЗ r ЛА и фактическими метеорологическими условиями

Фактические условия	Решение							Σ_j
	1 ЛА	2 ЛА	...	r ЛА	...	R ЛА	0 ЛА	
"Соответствуют"	n_{11}	n_{12}	...	n_{1r}	...	n_{1R}	n_{10}	n_1
"Не соответствуют"	n_{21}	n_{22}	...	n_{2r}	...	n_{2R}	n_{20}	n_2

Таблица 2

Стратегии использования метеоинформации в процессе функционирования авиационной системы

Стратегии	Прогностические методы	
	ВНГО	Грозное положение
S_{AC}^1	Гоголевой	Фауста
S_{AC}^2	Спарышкиной	Вайтинга
S_{AC}^3	Гоголевой	ИНС
S_{AC}^4	(Уравнение регрессии)*	Вайтинга
S_{AC}^5	(Уравнение регрессии)*	(ИНС)*

построенных моделей выше, чем при эмпирическом подходе. Данный факт не противоречит логичным рассуждениям, что является дополнительным подтверждением работоспособности построенных моделей и методики, целесообразности их применения при управлении метеозависимой АС.

Список литературы

1. Михайлов В. В. Оптимизация использования метеоинформации при решении практических задач // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 17—24.
2. Михайлов В. В. Построение искусственных нейронных сетей в практике получения стохастической прогностической информации // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 3.1 (25). С. 164—167.

3. Хандожко Л. А. Практикум по экономике гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 312 с.
4. Матвеев М. Г., Михайлов В. В. Применение теории фракталов для прогноза природных стохастических полей // Системы управления и информационные технологии. 2005. № 5 (22). С. 21—25.
5. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Иностранная литература, 1960. 400 с.
6. Михайлов В. В. Синтез методов анализа метеоинформации, необходимой для обеспечения боевой деятельности вооруженных сил РФ / Михайлов В. В., Киринос С. Л. // Вестник ВАИУ. 2008. № 2(8). С. 190—198.
7. Михайлов В. В. Применение метода Херста для прогноза стохастических объектов / В. В. Михайлов // Современные проблемы прикладной математики и математического моделирования. Матер. междунар. науч. конференции. Воронеж: ВГТА, 2006. С. 158—159.

УДК 519.714

Ю. Г. Борисенко, канд. техн. наук, нач. сектора,
Л. А. Володина, вед. инженер,
И. Ю. Касьянов, зам. глав. конструктора,
А. Г. Кузнецов, канд. техн. наук, ген. директор,
Московский институт электромеханики
и автоматики (технический университет)
aomiea@aviapribor.ru

Основные принципы унифицированного построения трактов автоматического управления полетом самолета на режиме "Уход на 2-й круг"

Изложены основные принципы законов автоматического управления полетом самолета в продольной и боковой плоскости на режиме "Уход на 2-й круг", реализованного в разработанных в МИЭА системах управления для современных гражданских самолетов.

Ключевые слова: авиация, системы управления полетом, посадка и уход на 2-й круг.

Уход на 2-й круг является режимом, обеспечивающим безопасность полета при заходе на посадку и посадке в случае возникновения непредвиденных обстоятельств — отказа двигателя или курсоглиссадных радиомаяков, осложнения метеорологических условий, отклонения от требуемой траектории снижения и др. Режим ухода начинается в момент принятия летчиком решения о прекращении посадки и характеризуется переходом самолета с режима снижения по глиссаде или траектории "выравнивания" в режим набора высоты и разгона для

повторного захода на посадку или увода на запасной аэродром. Автоматизация данного режима является первоочередной задачей разработок систем автоматического управления полетом самолета на режиме "Посадка". В современной авиации сертификация систем управления по III категории ICAO* *невозможна* без реализации в них автоматического ухода на 2-й круг.

Разработанные в МИЭА вычислительные системы управления полетом и тягой (ВСУПТ) реализуют универсальный алгоритм автоматического ухода на 2-й круг, позволяющий построить траекторию полета для вывода самолета из режима снижения по глиссаде или с любой точки траектории "выравнивания" (вплоть до касания основными стойками шасси поверхности ВПП) на режим набора высоты исходя из реальной энерговооруженности, обеспечивая при этом разгон по скорости до заданного значения (согласованного с Разработчиком самолетов), пространственное нахождение самолета в зоне, свободной от препятствий в районе аэродрома, и плавный выход самолета в горизонт на высоте круга. Такой подход применим практически для любого типа самолета.

При этом алгоритм обеспечивает соблюдение всех норм, предъявляемых к самолету на режиме "Уход на 2-й круг" как при всех работающих двигателях, так и при одном отказавшем двигателе во всех ожидаемых условиях эксплуатации (ОУЭ).

Алгоритм рассчитан на использование инерциальных и навигационных систем, соответствующих требованиям ARINC 704 по составу и точности измерения параметров.

* Международная организация гражданской авиации.

**Основные принципы алгоритма
автоматического управления
в продольной плоскости на режиме
"Уход на 2-й круг"**

Полная автоматизация режима "Уход на 2-й круг" в продольной плоскости осуществляется совместной работой канала руля высоты и канала тяги.

Функционально автоматический режим ухода на 2-й круг в продольной плоскости выполняется в три этапа:

- 1) этап перегиба траектории, т. е. перевод самолета с траектории снижения на траекторию набора высоты;
- 2) этап набора высоты и увеличения скорости полета;
- 3) этап "выполаживания" траектории (выход в горизонт к выставленной летчиком до включения режима заданной высоте круга $H_{зад}$).

Примечание 1. Третий этап режима не выполняется, если высота включения режима "Уход на 2-й круг" выше заданной высоты.

Автоматический режим "Уход на 2-й круг" осуществляется при непосредственном участии летчика, выполняющего следующие действия:

- 1) до включения режима летчик на пульте должен выставить заданную высоту круга ($H_{зад}$) в соответствии со схемой аэродрома или рекомендованную службой управления воздушным движением (УВД);
- 2) включение режима осуществляет летчик либо нажатием кнопки "2-й круг", расположенной на штурвале (как на самолетах фирмы ОАО "ИЛЮШИН" или фирмы АНТК "АНТОНОВ"), либо по сигналам от концевиков взлетного газа "ВГ" при перемещении рычагов управления двигателями (РУД) во взлетное положение (как на самолетах фирмы ОАО "ТУПОЛЕВ");
- 3) после включения режима, в соответствии с руководством по летной эксплуатации, летчик вручную осуществляет перевод механизации крыла из посадочного положения во взлетное положение;
- 4) при достижении положительной вертикальной скорости летчик убирает шасси;
- 5) по мере достижения соответствующих по РЛЭ скоростей летчик выполняет уборку механизации в крейсерское положение.

Основой алгоритма управления в продольной плоскости является формирование и отработка через канал руля высоты заданной вертикальной скорости ($V_{у зад}$).

Аналитически, с учетом всех трех этапов режима "Уход на 2-й круг", заданная вертикальная скорость формируется следующим образом:

$$V_{у зад} = \begin{cases} V_{у зад}^{у\х} & \text{при } \mu_{V_y} = 0; \\ V_{у зад}^{вып} & \text{при } \mu_{V_y} = 1, \end{cases}$$

где μ_{V_y} — признак начала фазы "выполаживания" траектории;

$V_{у зад}^{у\х}$ — заданная вертикальная скорость на первом и втором этапах режима "Уход на 2-й круг";

$V_{у зад}^{вып}$ — заданная вертикальная скорость на третьем этапе режима "Уход на 2-й круг".

Формирование заданной вертикальной скорости на первом и втором этапах режима "Уход на 2-й круг". Заданная вертикальная скорость на рассматриваемых первом и втором этапах ($V_{у зад}^{у\х}$) формируется по информации об энергетическом состоянии самолета на основе определения потенциальной вертикальной скорости ($V_y^{пот}$).

По определению, потенциальная вертикальная скорость — это такая максимальная вертикальная скорость, при которой самолет набирает высоту на скорости $V_{п}$ без ускорения, т. е. на максимальном, с точки зрения энергетических возможностей самолета, угле наклона траектории.

Известно, что полная энергия летящего самолета (E) равна сумме его потенциальной и кинетической энергии:

$$E = mgH + m \frac{V_{п}^2}{2}, \quad (1)$$

где H — высота полета; $V_{п}$ — путевая (траекторная) скорость; m — масса самолета; g — ускорение свободного падения.

Изменение полной энергии по времени равно

$$\frac{dE}{dt} = mg \frac{dH}{dt} + m V_{п} \frac{dV_{п}}{dt}. \quad (2)$$

Разделив обе части уравнения (2) на $mgV_{п}$, получим

$$\frac{1}{mgV_{п}} \frac{dE}{dt} = \frac{1}{V_{п}} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV_{п}}{dt}. \quad (3)$$

Уравнения движения самолета в траекторной системе координат в предположении, что $\varphi = \gamma = 0$, имеют вид

$$\frac{dV_{п}}{dt} = g(n_{xT} - \sin\theta); \quad (4)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{п} \sin\theta. \quad (5)$$

Решая совместно (4) и (5), найдем выражение для перегрузки вдоль траектории n_{xT} :

$$n_{xT} = \frac{1}{V_{\Pi}} \frac{dH}{dt} + \frac{1}{g} \frac{dV_{\Pi}}{dt}. \quad (6)$$

Сравнение (3) и (6) показывает, что изменение полной энергии самолета пропорционально значению перегрузки вдоль траектории n_{xT} .

Выражение (4) перепишем следующим образом:

$$n_{xT} = \sin\theta + \frac{1}{g} \frac{dV_{\Pi}}{dt}. \quad (7)$$

Из (7), учитывая определение потенциальной вертикальной скорости, имеем:

$$V_y^{\text{пот}} = V_{\Pi} \sin\theta_{\max} = V_{\Pi} n_{xT}. \quad (8)$$

Вместе с тем, текущее значение продольной перегрузки вдоль траектории n_{xT} можно определить через продольную и вертикальную перегрузки в связанных осях:

$$n_{xT} = n_{x_1} \cos\alpha_T - n_{y_1} \sin\alpha_T, \quad (9)$$

где n_{x_1} , n_{y_1} — продольная и вертикальная перегрузка в связанных осях (в единицах перегрузки); $\alpha_T = \vartheta - \theta$ — траекторный угол атаки; ϑ — угол тангажа; θ — угол наклона траектории.

Учитывая (8) и (9), приходим к формуле вычисления потенциальной вертикальной скорости $V_y^{\text{пот}}$ в виде

$$V_y^{\text{пот}} = V_{\Pi} (n_{x_1} \cos(\vartheta - \theta) - n_{y_1} \sin(\vartheta - \theta)), \quad (10)$$

где сигналы n_{x_1} , n_{y_1} , ϑ , θ и V_{Π} поступают из инерциальной навигационной системы (ИНС).

Заданная вертикальная скорость на первом и втором этапах режима "Уход на 2-й круг" определяется на основе потенциальной вертикальной скорости:

$$V_{y\text{зад}}^{\text{yx}} = \begin{cases} V_y^{\max}, & \tilde{V}_y^{\text{зад}} \geq V_y^{\max}; \\ \tilde{V}_y^{\text{зад}}, & V_y^{\min} < \tilde{V}_y^{\text{зад}} < V_y^{\max}; \\ V_y^{\min}, & \tilde{V}_y^{\text{зад}} \leq V_y^{\min}; \end{cases} \quad (11)$$

$$\tilde{V}_y^{\text{зад}} = \frac{1}{Tp+1} V_y^{\text{yx}}; \quad (12)$$

$$V_y^{\text{yx}} = K_p (V_y^{\text{пот}}) V_y^{\text{пот}}, \quad (13)$$

где $K_p(V_y^{\text{пот}})$ — коэффициент, который определяет соотношение составляющих полной энергии (тя-

говооруженности самолета) на набор высоты и на разгон по скорости и выбирается в результате математического моделирования таким, чтобы во всех ожидаемых условиях эксплуатации (ОУЭ) для данного типа самолета обеспечить:

- требуемый по нормам минимальный градиент скороподъемности;
- при достаточной тяговооруженности самолета полет с разгоном до потребных для данного типа самолета скоростей, а при малой тяговооруженности полет с $\dot{V} > 0$;

V_y^{\max} — верхнее ограничение заданной вертикальной скорости, которое выбирается из условий комфорта, тем самым предотвращая большие градиенты набора высоты;

$V_y^{\min} = 0$ — нижнее ограничение заданной вертикальной скорости, позволяющее выводить самолет в горизонт с целью предотвратить снижение самолета при недостатке тяги двигателя;

$\frac{1}{Tp+1}$ — апериодический фильтр с постоянной времени T , выраженный через оператор Лапласа (p).

Из формулы (12) видно, что в определении заданной вертикальной скорости используется апериодический фильтр в целях:

- фильтрации входной информации, использующейся в вычислении потенциальной вертикальной скорости $V_y^{\text{пот}}$ и повышения качества регулирования контура;
- повышения эффективности первого этапа режима "Уход на 2-й круг" (перегиба траектории и обеспечения минимума просадки) за счет выставки начального значения на выходной сигнал

апериодического фильтра $\tilde{V}_y^{\text{зад}}(0)$ и выбора соответствующей постоянной времени фильтра (T).

Формирование заданной вертикальной скорости на режиме "Уход на 2-й круг" на основе потенциальной вертикальной скорости позволяет изменить траекторию набора высоты в зависимости от тяговооруженности самолета, т. е. алгоритм эффективно выбирает потребную траекторию набора высоты при изменении массы самолета, при полетах со всеми исправными двигателями или с отказом одного двигателя, на аэродроме любой высоты, при любой температуре окружающего воздуха и при воздействии любых ветровых возмущений.

Формирование заданной вертикальной скорости на третьем этапе режима "Уход на 2-й круг" ($V_{y\text{зад}}^{\text{вып}}$). При подходе самолета к выставленной

летчиком заданной высоте круга ($H_{\text{зад}}$) проводится анализ определения момента начала выхода в горизонт (другими словами, признака начала фазы "выполживания" траектории $\mu_{V_y} = 1$) на основе сравнения отклонения текущей относительной высоты ($H_{\text{отн}}^{\text{тек}}$) от заданной высоты ($H_{\text{зад}}$) с упреждением ΔH_y ($\Delta H_{\text{зад}} = H_{\text{зад}} - H_{\text{отн}}^{\text{тек}} < \Delta H_y$).

Упреждение формируется следующим образом: $\Delta H_y = K_y (V_{y\text{зад}}^{\text{yx}})^2$, где K_y подбирается из условия минимизации перерегулирования текущей высоты относительно заданного значения при совершении маневра с перегрузкой в пределах ограничений.

При получении признака начала фазы "выполживания" ($\mu_{V_y} = 1$) формируется переменная заданная вертикальная скорость $V_{y\text{зад}}^{\text{вып}}$, которая плавно уменьшается до значения не менее 0,5 м/с.

При пересечении самолетом заданной высоты круга ($H_{\text{зад}}$) обеспечивается автоматическое отключение режима "Уход на 2-й круг" в продольном канале и включение режима "Стабилизация высоты".

Формирование управляющего сигнала на режиме "Уход на 2-й круг". Обработка заданной вертикальной скорости ($V_{y\text{зад}}$) осуществляется типовым алгоритмом стабилизации вертикальной скорости путем формирования позиционного и интегрального трактов управления на основе сигнала $\Delta V_y = V_y - V_{y\text{зад}}$ с учетом демпфирующей составляющей по сигналу ω_z и компенсационного сигнала коррекции по закрылкам.

Алгоритм автоматического управления в канале тяги на режиме "Уход на 2-й круг". Управление тягой двигателя самолета выполняется путем перемещения РУД, при этом выходным сигналом канала тяги системы управления является сигнал скорости отклонения привода регулирования тяги (ПРТ) ($\dot{\alpha}_{\text{РУД}}^{\text{зад}}$).

Управление тягой двигателей на режиме "Уход" имеет две фазы:

- 1) "управление разгоном по скорости";
- 2) "стабилизация заданной скорости".

Для обеспечения качественного (апериодического) выхода самолета на заданную скорость вводится упреждение по переходу от фазы "управление разгоном по скорости" к фазе "стабилизации

заданной скорости" путем формирования признака переключения (μ_v^{yx}) в виде:

$$\mu_v^{\text{yx}} = \begin{cases} 0 & \text{при } (V_{\text{пр}} - V_{\text{пр.зад}} \leq -\Delta \bar{V}) \wedge \mu_v^{\text{yx}}(n-1) = 0; \\ 1 & \text{при } (V_{\text{пр}} - V_{\text{пр.зад}} > -\Delta \bar{V}) \vee \mu_v^{\text{yx}}(n-1) = 1, \end{cases}$$

где $\Delta \bar{V}$ км/ч — положительная константа.

◆ Фаза "управления разгоном по скорости" (при $\mu_v^{\text{yx}} = 0$). Традиционно при включении режима "Уход на 2-й круг" нажатием кнопки "2-й круг" автомат тяги переводит РУД в положение взлетного режима работы двигателей с максимальной скоростью $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{зад}}$, вследствие чего у самолетов в определенных условиях полета развиваемая тяговооруженность может приводить к дискомфорту вследствие значительных вертикальных скоростей при недостаточных темпах нарастания приборной скорости, что иногда приводило к отключению летчиком автоматического режима "Уход на 2-й круг".

Для исключения этого явления, которое наиболее ярко наблюдалось на самолетах типа ИЛ-96-300, системы управления, разработанные в МИЭА, обеспечивают перемещение РУД с уменьшенной скоростью в сторону взлетного режима и остановку РУД в промежуточном положении, не доходя до взлетного режима, при одновременном выполнении следующих условий:

а) $V_y^{\text{пот}} \geq V_{y\text{min}}^{\text{пот}}$, где $V_{y\text{min}}^{\text{пот}}$ — обеспечивает приемлемый градиент набора и разгон по скорости;

б) положение РУД должно обеспечивать режим работы двигателей не менее "номинального".

После выполнения условий а) и б) выходной сигнал $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{зад}}$ обнуляется. В случае невыполнения хотя бы одного из условий РУД продолжают передвигаться к взлетному положению.

При включении режима "Уход на 2-й круг" по обжатию концевиков "ВГ"* (на самолетах семейства ТУ-204/ТУ-214) автомат тяги до перехода в фазу "стабилизации заданной скорости" блокирует перемещение РУД в сторону положения малого газа (МГ).

◆ Фаза "стабилизация заданной скорости" (при $\mu_v^{\text{yx}} = 1$) обеспечивается с использованием типового алгоритма, который также применяется в режимах "Посадка" и при полете по маршруту, при частичных изменениях настроек коэффициентов трактов управления для режима "Уход на 2-й круг".

*ВГ — взлетный газ.

Особенности автоматического управления на режиме "Уход на 2-й круг" по категории III ICAO. Изложенный выше алгоритм автоматического управления на режиме "Уход на 2-й круг" реализован в бортовых системах управления современных гражданских самолетов: семейства ИЛ-96, семейства ТУ-204/ТУ-214, ТУ-334, АН-148. На самолетах ИЛ-96-300 и АН-148-100 алгоритм оценен в ходе сертификационных испытаний самолетов по внедрению метеоминимума III категории ICAO, т. е. он обеспечивает автоматический уход с выполнением всех предъявляемых к нему требований с любой точки траектории снижения вплоть до касания поверхности ВПП.

Особенностью "ухода" с малых высот ($H < 2$ м) является то, что на завершающем посадочном этапе полета для торможения тяга двигателей сбрасывается до значения "малого земного газа". В этом случае заметно увеличивается потребный диапазон перемещения РУД и, как следствие, увеличивается время перевода тяги двигателя до взлетного значения. Кроме того, в силу специфики характеристик двигателя его приемистость в диапазоне малых тяг уменьшена. Все вышеизложенное сказывается на увеличении "просадки" самолета, и поэтому такие "уходы" происходят, как правило, с касанием поверхности ВПП.

Для того чтобы в случае возможного касания самолетом поверхности ВПП вертикальная скорость касания ($V_y^{\text{кас}}$) и угол тангажа касания ($v_{\text{кас}}$) были бы по модулю не больше допустимых значений $V_y^{\text{кас доп}}$ и $v_{\text{кас доп}}$, большое значение приобретает правильный выбор начального значения на выходной сигнал апериодического фильтра $\tilde{V}_y^{\text{зад}}(0)$, постоянной времени этого фильтра T (см. формирование $V_{y\text{зад}}^{\text{yx}}$) и коэффициентов прямой и интегральной цепей алгоритмов стабилизации заданной вертикальной скорости.

Основные принципы автоматического управления в горизонтальной плоскости на режиме "Уход на 2-й круг"

В боковой плоскости автоматический алгоритм управления на режиме "Уход на 2-й круг" обеспечивает:

◆ *на воздушном участке полета:*

- стабилизацию магнитного путевого угла (ϕ_M) по курсу ВПП ($\psi_{\text{ВПП}}$);
- ограничение по крену в зависимости от высоты полета $|\gamma| \leq \gamma^{\text{max}} = F(H)$, оговоренному в нормативных документах на САУ для конкретного самолета, что особо важно для "уходов" с малых высот;
- нахождение самолета в горизонтальной плоскости в зоне, свободной от препятствий

$|Z| \leq Z^{\text{max}}(H)$, оговоренных в нормативных документах АП-139, где Z — боковое отклонение от оси ВПП;

◆ *в случае касания поверхности ВПП:*

- не превышение углом крена (γ) допустимого значения для данного типа самолета $\gamma^{\text{кас}}$ ($|\gamma| \leq \gamma^{\text{кас}}$);
- расположение точки касания поверхности ВПП внешним колесом основного шасси на расстоянии не более 21 м от оси ВПП.

Автоматизация режима "Уход на 2-й круг" в боковой плоскости осуществляется совместной работой канала элеронов и канала руля направления.

Основные принципы автоматического управления в канале элеронов. Основой автоматического управления в канале элеронов является формирование и отработка сигнала заданного угла крена ($\gamma_{\text{зад}}$), вычисляемого пропорционально отклонению магнитного путевого угла от заданного курса ВПП ($\Delta\phi = \phi_M - \psi_{\text{ВПП}}$).

Практика использования информации о магнитном путевом угле в алгоритме управления в горизонтальной плоскости на режиме "Уход на 2-й круг" показала, что точность сигнала ϕ_M может быть недостаточной для выдерживания самолета по курсу ВПП. Но использование сигнала углового бокового отклонения от равноточной зоны ϵ_K , поступающего от РТС, использующейся на режиме "Посадка" по категории II и III, и дающего хорошую точность стабилизации магнитного путевого угла по курсу ВПП, на режиме "Уход на 2-й круг" недопустимо, так как одной из причин "ухода" является отказ этой системы.

Поэтому в автоматическом управлении на режиме "Уход" для обеспечения полета по курсу ВПП используется вычисленное при полете по глиссаде среднее значение магнитного путевого угла ($\psi_{\text{ВПП}}^{\text{yx}}$). Среднее значение вычисляется в диапазоне высот $60 \text{ м} < H < 150 \text{ м}$ при выполнении следующих условий: $|\Delta\phi = \phi_M - \psi_{\text{ВПП}}| < \text{const}_1$, $|\omega_y| < 0,5^\circ/\text{с}$ и $|\omega_x| < 1,5^\circ/\text{с}$ (const_1 — константа, выбираемая исходя из значения погрешности вычисления датчика ϕ_M), при этом, если условия не выполняются, то процесс осреднения приостанавливается.

Такой алгоритм вычисления $\psi_{\text{ВПП}}^{\text{yx}}$ позволяет учесть ошибку сигнала датчика магнитного путевого угла ϕ_M и обеспечить полет самолета по курсу ВПП с приемлемой точностью.

С учетом вышеизложенного, заданный угол крена на режиме "Уход" ($\gamma_{\text{зад}}^{\text{yx}}$) формируется следующим образом:

$$\gamma_{\text{зад}}^{\text{yx}} = K_\phi(M)(\phi_M - \psi_{\text{ВПП}}^{\text{yx}}) - 57,3n_z,$$

где ϕ_m — магнитный путевой угол, поступающий с ИНС;

n_z — боковая перегрузка, поступающая с ИНС, используется для более эффективного управления, особенно при отказе двигателя;

$\psi_{ВПП}^{yx}$ — вычисленный осреднением магнитный путевой угол;

$K_\phi(M)$ — коэффициент усиления, корректирующий $\gamma_{зад}^{yx}$ по числу Маха (M).

Для ограничения крена самолета в зависимости от высоты полета (H) $|\gamma| \leq \gamma^{\max} = F(H)$, а также для увеличения эффективности работы канала элеронов (особенно в случае отказа одного двигателя), сигнал $\gamma_{зад}^{yx}$ пропускается через так называемое "прогнозное" ограничение и преобразуется в сигнал $\gamma_{зад}$, который в дальнейшем и обрабатывается элеронами.

"Прогнозное" ограничение заданного угла крена формируется в следующем виде: сигнал $\gamma_{зад}^{yx}$ ограничивается сигналом $\gamma^{\max}(H)$ (того же знака), только в том случае, когда одновременно и сигнал $\gamma_{зад}^{yx}$ превосходит сигнал γ^{\max} и так называемый сигнал "прогнозного" крена: $\gamma^{\text{прог}} = \gamma + \dot{\gamma}$, включающий в себя сам угол крена и скорость его изменения, превосходит значение $\gamma^{\max}(H)$ (с тем же знаком), т. е.:

$$\gamma_{зад} = \left\{ \begin{array}{l} \gamma^{\max}(H) \text{ при } \gamma_{зад}^{yx} \geq \gamma^{\max}; \\ \gamma_{зад}^{yx} \text{ при } -\gamma^{\max} < \gamma_{зад}^{yx} < \gamma^{\max}; \\ -\gamma^{\max}(H) \text{ при } \gamma_{зад}^{yx} \leq -\gamma^{\max} \\ \gamma_{зад}^{yx} \text{ — в остальных случаях.} \end{array} \right\} \text{ при}$$

$$(\gamma_{зад}^{yx} \geq \gamma^{\max} \wedge \gamma^{\text{прог}} \geq \gamma^{\max}) \vee (\gamma_{зад}^{yx} \leq -\gamma^{\max} \wedge \gamma^{\text{прог}} \leq -\gamma^{\max}).$$

Примечание 2. Для минимизации перерегулирования углом крена предельно-допустимых значений (особенно это важно для "уходов" с касанием) возможен вариант формирования границ защиты угла крена переменными на основе введения упреждения по угловой скорости $\dot{\gamma}$, т. е. в виде: $\gamma^{\max}(H) + K\dot{\gamma}$.

Отработка заданного угла крена ($\gamma_{зад}$) проводится типовым алгоритмом путем формирования позиционного и интегрального трактов управления на основе сигнала $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_{зад}$ с учетом демпфирующей составляющей по сигналу $\dot{\gamma}$.

Из изложенного следует, что парирование боковых возмущений через канал элеронов выполняется с помощью угла крена, с последующим выводением самолета по магнитному путевому углу на курс ВПП.

Основные принципы автоматического управления в канале руля направления. Основой автоматического управления в канале руля направления является традиционное использование сигнала боковой перегрузки (n_z), который участвует в формировании сигналов как позиционного, так и интегрального трактов управления.

Кроме того, в целях минимизации углов скольжения при вводе и выводе из крена в формировании позиционного сигнала управления в канале руля направления используется скорректированный по числу Маха сигнал из канала элеронов $\omega_x^{\text{зад}}$, пропорциональный сигналу $\Delta\gamma$.

На режиме "Уход на 2-й круг" на этапе перегиба траектории и начальном этапе набора высоты большую роль играет канал руля направления, который в основном парирует увеличивающийся с переводом тяги двигателя во взлетный режим разворачивающийся момент, вызванный отказом одного двигателя.

Особенно это актуально для уходов с малых высот, где расстояние до границы зоны ограничения препятствий в горизонтальной плоскости — наименьшее. Практика показывает, что при отказе двигателя управление с использованием только сигнала боковой перегрузки n_z не обеспечивает выдерживание бокового отклонения от оси ВПП в зоне, свободной от препятствий, так как коэффициенты усиления по n_z в тракте не могут быть очень большими из-за ограничения по запасам устойчивости самолета.

Эффективным способом парирования отказа двигателя является формирование в канале руля направления дополнительного сигнала, пропорционального значению разнотяговости двигателей.

Компенсация дебалансирующего момента, вызванного отказом двигателя, может быть обеспечена в рамках как системы штурвального управления, так и системы автоматического управления. Так, на самолетах семейства ТУ-204 сигнал компенсации разнотяговости формируется в АСШУ*-204 как позиционный сигнал канала руля направления на основе сигнала разности оборотов высокого давления двигателей ($n_{2дв1,2}$), корректируемого по приборной скорости полета. Здесь $n_{2дв}$ рассматривается как эквивалент тяги двигателя ($\text{ЭТ}_{дв}$).

На других транспортных самолетах (таких, как Ту-334/АН-148) подобная компенсация разнотяговости в системе штурвального управления не предусмотрена, поэтому эта функция реализуется в

* АСШУ — автоматическая система штурвального управления.

ВСУПТ. В качестве эквивалента тяги двигателей на самолете ТУ-334 взяты обороты низкого давления ($n_{\text{двл}2}$), на самолете АН-148 — степень повышения давления двигателя ($\pi_{\text{кдвл}2}$).

Особенностью алгоритма компенсации разнотяговости в ВСУПТ является то, что в канале руля направления формируются два сигнала компенсации: позиционный ($\sigma_{\text{к}}^{\text{H}}$) и интегральный ($\sigma_{\text{к бал}}^{\text{H}}$).

Сигнал $\sigma_{\text{к}}^{\text{H}}$ представляет собой изодромизированный сигнал разности эквивалентов тяги двигателей ($\overline{\Delta\text{ЭТ}}_{\text{дв}}$), скорректированный по приборной скорости ($V_{\text{пр}}$), высоте полета (H) и боковой перегрузке (n_z), формируемый следующим образом:

$$\sigma_{\text{к}}^{\text{H}} = \frac{T_p}{T_p + 1} \tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}}, T = 20 \text{ с};$$

$$\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} = K_1(H)K_2(V_{\text{пр}})K_{\text{к ух}}^{\text{H}}(n_z)\overline{\Delta\text{ЭТ}}_{\text{дв}},$$

где $\frac{T_p}{T_p + 1}$ — изодромное звено в операторной форме с постоянной времени T ; $\overline{\Delta\text{ЭТ}}_{\text{дв}}$ — пройденная через зону нечувствительности с порогом Δ разность эквивалентов тяги $\Delta\text{ЭТ}_{\text{дв}} = \text{ЭТ}_{\text{дв}}^{\text{прав}} - \text{ЭТ}_{\text{дв}}^{\text{лев}}$.

Заметим, что зона Δ необходима для того, чтобы система не реагировала на "разнотяг" при асинхронной и безотказной работе двигателей;

$K_1(H)$ — коэффициент усиления, корректирующий сигнал $\overline{\Delta\text{ЭТ}}_{\text{дв}}$ по высоте (H);

$K_2(V_{\text{пр}})$ — коэффициент усиления, корректирующий сигнал $\overline{\Delta\text{ЭТ}}_{\text{дв}}$ по приборной скорости ($V_{\text{пр}}$);

$K_{\text{к ух}}^{\text{H}}$ — коэффициент усиления, которому в момент начала режима "Уход" присваивается большее значение для энергичной компенсации возрастающей в начале режима "разнотяговости", и который при смене знака боковой перегрузки n_z (показатель полной компенсации) рекуррентно (с коэффициентом $\approx 0,99$) уменьшается.

Такой алгоритм формирования коэффициента $K_{\text{к ух}}^{\text{H}}$ позволяет на первом этапе режима "Уход" энергично отклонить руль направления на большие углы и, тем самым, минимизировать боковые отклонения самолета от продолженной оси ВПП (Z) в сторону отказавшего двигателя, а затем на втором этапе режима "Уход" при падении тяги (с увеличением высоты) позволяет избежать большой перекомпенсации по боковому отклонению в сторону исправного двигателя.

Сигнал $\sigma_{\text{к}}^{\text{H}}$ — форсирующий сигнал, который работает при изменении сигнала $\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}}$, а в установившемся состоянии сигнала $\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}}$ равен нулю.

Сигнал $\sigma_{\text{к бал}}^{\text{H}}$ поступает в тракт балансировки канала руля направления, что обеспечивает сохранение функции компенсации и при отказных ситуациях ВСУПТ.

Формирование интегральной составляющей основано на использовании логического анализа полярности сигнала n_z и имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{к бал}}^{\text{H}} = \begin{cases} \left. \begin{cases} \tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} \cdot 10n_z & \text{при } 0 < n_z < 0,1; \\ \tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} & \text{при } n_z > 0,1, \end{cases} \right\} & \text{при } (\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} < 0) \wedge (n_z > 0); \\ 0 & \text{при } (\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} < 0) \wedge (n_z < 0); \\ \left. \begin{cases} \tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} \cdot 10n_z & \text{при } -0,1 < n_z < 0; \\ \tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} & \text{при } n_z < -0,1, \end{cases} \right\} & \text{при } (\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} > 0) \wedge (n_z < 0); \\ 0 & \text{при } (\tilde{\sigma}_{\text{к}}^{\text{H}} > 0) \wedge (n_z > 0). \end{cases} \quad (14)$$

Как видно из алгоритма (14), при изменении знака перегрузки n_z сигнал $\sigma_{\text{к бал}}^{\text{H}}$ обнуляется. Это предотвращает интенсивное боковое отклонение от оси ВПП в сторону исправного двигателя.

Вывод. Изложенные в данной статье принципы алгоритмического построения продольного и бокового каналов управления обеспечивают качественное управление на режиме "Уход на 2-й круг" с учетом энергетических возможностей самолета при включении режима в любой точке траектории снижения, вплоть до касания ВПП, в условиях значительных ветровых возмущений, отказа одного двигателя, на высотных и равнинных аэродромах.

Рассмотренный алгоритм как базовая структура используется в составе систем управления полетом и тягой самолетов, разработанных и разрабатываемых в МИЭА.

Список литературы

1. Белгородский С. Л. Автоматизация управления посадкой самолета. М.: Транспорт, 1972.
2. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973.
3. Автоматизированное управление самолетами и вертолетами / С. М. Федоров, В. В. Дабкин и др. М.: Транспорт, 1977.

О. Б. Кербер, канд. техн. наук, нач. отдела,
В. Н. Мазур, канд. техн. наук, нач. сектора,
К. Т. Цатурян, д-р техн. наук, проф.,
 глав. науч. сотр.,
 Московский институт электромеханики
 и автоматики
 aomiea@aviapribor.ru

Особенности автоматизации посадки самолетов гражданской авиации по категории III ICAO*

Рассмотрены особенности и трудности разработки бортового оборудования и алгоритмов управления автоматической посадкой гражданских самолетов для сертификации по требованиям категории III ICAO.

Ключевые слова: автоматическая посадка, вариационная задача, стохастические дифференциальные уравнения, нелинейная динамика

Международная организация ICAO определила ряд эксплуатационных категорий, характеризующих высотой принятия решения и дальностью видимости на ВПП. Например, при посадке магистральных самолетов по требованиям категории III ICAO допустимая относительная высота принятия решения — не ниже 30 м, а дальность видимости на ВПП — более 200, 50 и 0 м соответственно для категорий IIIA, IIIB, IIIC ICAO [1]. Автоматически посадка III категории, сертифицированная на самолете ИЛ-96-300, включает этапы захода на посадку, посадки без высоты принятия решения с выравниванием и опусканием носового колеса, а также пробег по ВПП до скорости не менее 75 км/ч при дальности видимости на ВПП не менее 150 м.

Расчетно-теоретическая часть проектирования системы автоматического управления режимом приземления самолета сводится к последовательному решению трех задач:

- создание модели объекта управления с учетом воздействия окружающей среды;
- разработка алгоритмов управления и контроля с учетом отказов элементов систем управления;
- доказательство адекватности математической модели реальному процессу посадки самолета.

Одной из проблем автоматизации посадки по III категории является сертификация бортового оборудования, включающая доказательство того, что спроектированная система обеспечивает выполнение высоких требований безопасности по критерию точности. Эти требования допускают выход параметров приземления за предельно допустимые значения с чрезвычайно малой вероятностью $p_{\text{доп}} = 10^{-6} \dots 10^{-8}$ [2]. Для доказательства необходимо разработать методику, позволяющую

* Международная организация гражданской авиации.

выполнить эту работу. Требования должны выполняться [3] во всех отдельных условиях эксплуатации, учитывающих:

- конфигурацию самолета (положение закрылков);
- положение центра тяжести;
- посадочный вес;
- условия ветра (турбулентность, сдвиг ветра и т. д.);
- характеристики инструментальной системы посадки ILS;
- разброс параметров системы автоматической посадки;
- высоту аэродрома;
- температуру воздуха;
- уклоны ВПП;
- профиль земной поверхности под траекторией захода на посадку;
- отказ критического двигателя (двигателя, наиболее чувствительного к критическим маневрам самолета).

Рассмотрим проблемы, возникающие при составлении и исследовании математической модели процесса посадки на этапе приземления и пробега [4–5].

1. Имеется нестационарность и нелинейность дифференциальных уравнений, описывающих поведение всей системы в целом. Так, математическая модель возмущенного движения самолета представляет собой систему дифференциальных уравнений высокого порядка (примерно 30–40 уравнений). Действующие на самолет и систему управления возмущения представляются случайными величинами, постоянными для каждой реализации, а также случайными функциями времени, задаваемыми с помощью формирующих фильтров с белыми шумами на входе.

Расширенная система уравнений, включающая уравнения движения и уравнения для формирующих фильтров, имеет вид

$$\dot{x} = f(t, x, c) + g(t, x, c)\xi(t), \quad (1)$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ — n -мерный вектор состояния системы;

$\xi = [\xi_1, \dots, \xi_m]^T$ — m -мерный вектор независимых гауссовских белых шумов единичной интенсивности;

f, g — детерминированные векторная и матричная функции.

Вектор параметров $c = (c_1, \dots, c_m)$ задается плотностью вероятности: $\Omega = (\Omega_1, \dots, \Omega_m)$. Задается также условие окончания процесса по высоте H : в случае автоматической посадки это условие $H_m = 0$, где H_m — высота кромки основной стойки колес шасси. В процессе моделирования необходимо определить вероятность превышения некоторыми координатами их предельных значений в момент окончания процесса посадки. Искомая вероятность может быть приближенно найдена с

помощью решения вариационной задачи. Для этого предполагается, что все случайные параметры c_i , $i = \overline{1, m}$, фиксированы. Тогда возмущениями являются функции $\xi_1(t), \dots, \xi_m(t)$.

В уравнении (1) вектор случайных параметров c фиксирован, а время T не задано. Если решена вариационная задача, то условная вероятность определяется соотношением:

$$P(x_i > \frac{x_{i\max}}{c}) = \int_R \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{v^2}{2}} dv, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Безусловная вероятность приближенно находится по формуле

$$P(x_i > x_{i\max}) = \int_R P(x_i > \frac{x_{i\max}}{c}) \Omega_i dc, \quad i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Основными причинами неточности решения вариационной задачи является грубая аппроксимация функций $\xi_i(t)$, а также исключение части варьируемых параметров из рассмотрения.

Для повышения точности решения вариационной задачи в работе [7] предлагается делить все возмущения на две группы — "главные" и "второстепенные". Ищется решение задачи оптимизации при фиксированных значениях случайных параметров $c^* = (c_1, \dots, c_m)$ путем варьирования функций $\xi_1(t), \dots, \xi_m(t)$. Затем методом статистических испытаний определяется дисперсия координаты x_i , обусловленная случайными изменениями всех возмущений, кроме "главных" параметров c_1, \dots, c_m .

Для сложных систем, описываемых стохастическими нелинейными дифференциальными уравнениями (1), предпочтительным методом оценки вероятностных характеристик является метод статистических испытаний. Вследствие простоты использования такой метод широко применяется в инженерной практике. Вопрос состоит только в том, как довести требуемый объем статистического моделирования до приемлемого уровня.

Оказывается, что для оценки столь малых вероятностей статистическое моделирование в приемлемом объеме можно провести, если его выполнить по схеме существенной выборки. Сокращение объема достигается тем, что при моделировании имитируется действие лишь тех возмущений, которые относятся к области резонансных частот исследуемой системы. Тем самым осуществляется переход от оценки редких случайных событий к оценке событий, число повторений которых относительно велико.

Для моделирования по схеме существенной выборки достаточно математические ожидания случайных возмущений сместить на некоторые детерминированные функции времени, называемые эк-

вивалентными возмущениями. Экстремальные возмущения назначаются так, чтобы их энергия была минимальной, а математическое ожидание траекторий динамической системы по оцениваемой переменной проходило через заданные области начального и конечного состояний. Область конечного состояния представляет собой область недопустимых ошибок управления. Основная трудность при расчете экстремальных возмущений заключается в необходимости решения так называемой двухточечной краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка. Надо составить уравнения возмущенного движения самолета, провести их статистическую линеаризацию, назначить итерационную процедуру определения экстремальных возмущений, составить программу расчета на ЭВМ и выполнить расчет.

2. Этап приземления является кратковременным, что делает невозможным энергичные маневры при выходе на ось ВПП. Аналогичная проблема возникает при наличии в конце этапа приземления значительных составляющих путевой скорости, нормальных и программной траектории.

3. Весь этап автоматической посадки требует точного прецизионного управления траекторией. Обычно требования к системе задаются в виде допустимых отклонений по высоте и вертикальной скорости полета, а также боковых отклонений от траектории на воздушном участке и на пробеге и т. п., что усложняет приближение контролируемой переменной к максимальному или минимальному допустимому значению. Небольшое превышение вертикальной скорости в момент касания ВПП приводит к "грубой посадке". При пробеге отклонение самолета от средней линии ВПП может привести к аварийной ситуации.

4. Так как на этапе выравнивания фактически возникает необходимость автоматизации поведения (способа управления) самого летчика как оператора в человеко-машинной системе, то отсутствие усредненного поведения с учетом возможных отклонений не позволяет, как обычно принято в теории автоматического управления, вычислить соответствующую траекторию, вокруг которой протекает сам процесс управления.

5. Имеются трудности, связанные с обеспечением правильного функционирования силовой установки при изменении тяги двигателя на последнем этапе полета, включая приземление, потому что особое влияние на процесс посадки оказывает необходимость учитывать взаимосвязанность процедур одновременного управления рулем высоты и сектора газа двигателя.

6. Задачи обеспечения соответствующих требований чрезвычайно усложняются из-за необходимости учитывать на этапе приземления ряд обстоятельств, связанных с определением аэродинамических коэффициентов подъемной силы, лобового сопротивления и аэродинамического момента с

учетом "экранного эффекта близости земли". Для тяжелых транспортных самолетов измерение этих коэффициентов в летном эксперименте чрезвычайно затруднительно. Это замечание относится и к оценке достоверности данных о влиянии порывов ветра и турбулентности.

7. Изменения угла атаки в процессе приземления значительны и происходят в области, близкой к критическим значениям, где зависимость лобового сопротивления и подъемной силы от угла атаки существенно нелинейны.

Начиная с девяностых годов прошлого века были опубликованы работы, утверждающие, что в нелинейных системах при определенных условиях возможно появление жесткой турбулентности — хаотического режима с высокими выбросами. Исследование этого режима привело к пониманию того, что в нелинейных нестационарных системах, в которых возникают быстрые и медленные движения, необходимо рассматривать их взаимодействие. Было установлено, что в нелинейных системах третьего и большего порядка возможно появление хаотических колебаний. Появилась новая математическая дисциплина — нелинейная динамика, согласно которой помехи и шумы в разнообразных технических системах представляют собой "странные аттракторы" — точки притяжения, к которым стремятся решения определенных нелинейных дифференциальных уравнений, порождающих хаотические колебания. Поведение таких систем зависит от начальных условий. В одной из ранних работ в этой области отмечается [8]: "Некоторые характерные особенности хаотической динамики, а именно, чувствительность к изменениям параметров и непредсказуемость поведения иногда могут быть присущи нехаотическим движениям. Такая перспектива повергает в ужас инженеров, занимающихся численным моделированием нелинейных систем на компьютерах.

Для численного анализа весьма важно располагать критерием, позволяющим распознавать, обладает ли данная конкретная нелинейная система

чувствительностью к небольшим вариациям параметров или не обладает. Пока нет общего критерия предсказуемости в нелинейной динамике". В последнее время такой критерий появился. Сотрудники Института прикладной математики им. М. В. Келдыша в своей книге [9] пишут: "одной из особенностей хаотических режимов является неустойчивость каждой траектории, принадлежащей хаотическому аттрактору. Очень удачной мерой этой неустойчивости оказались так называемые характеристические показатели Ляпунова. Они явились одной из важнейших характеристик аттракторов, поскольку позволяют оценить:

- фрактальную размерность аттрактора;
- энтропию динамической системы;
- характеристическое время предсказуемости поведения системы".

К сожалению, новый теоретический подход, связанный с разработкой нового научного направления создания самоорганизующихся систем, еще не доведен до инженерных приложений.

Список литературы

1. **Требования** по сертификации всепогодных полетов (CSAWO). Европейское агентство авиационной безопасности, 2002.
2. **Технические** требования к самолетам транспортной категории, выполняющим всепогодные полеты. АРМАК, 2003.
3. **Требования** одобрения погодных минимумов категории III для взлета, посадки и пробега. Циркуляр FAA FC-120-28D. 1999.
4. **Мальшев В. В., Кибзун А. И.** Анализ и синтез высокоточного управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1987.
5. **Белгородский С. Л.** Автоматизация управления посадкой самолета. М.: Транспорт, 1972.
6. **Гуськов Ю. П., Загайнов Г. И.** Управление полетов самолетов. М.: Машиностроение, 1980.
7. **Кузьмин В. П., Ярошевский В. А.** Оценка предельных отклонений фазовых координат динамической системы при случайных возмущениях. М.: Наука, 1985.
8. **Мун Ф.** Хаотические колебания. М.: МИГ, 1990.
9. **Маленецкий Г. Г., Потапов А. Б.** Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Едиториал, 2002.

18—20 октября 2010 г. в Институте проблем управления РАН, г. Москва
состоится конференция

"Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения"

Подробная информация о конференции и условиях участия в ней размещаются
на сайте: <http://cmm.ipu.ru>

Для подачи статьи и регистрации можно воспользоваться сайтом: <http://cmm-conf.ru>

CONTENTS

Krasnoshchechenko V. I. The Theoretical Group Approach to Synthesis of Regulators of Nonlinear Affine Systems on an Example of Control of a Inverted Pendulum 2

Synthesis of algorithm of control by a two wheeled inverted pendulum (TWIP) is considered. The synthesis is based on a decomposition of the nonlinear differential equations of the plant and using of model predictive control with gramian of controllability. The technique of synthesis, a conditions of convergence of the algorithm and results of simulation at movement TWIP on a circle are submitted. Robust properties of the offered regulator to disturbances are shown.

Keywords: decomposition of the differential equations, Lie groups, nonlinear affine systems, a method of model predictive control, synthesis of regulators, gramian of controllability

Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Agent Technologies for Automated Information-Control Systems. Part I. The Bases of Agent Approach 11

The base positions of agent approach are presented. The typification is reduced and the properties of programmed agents are discussed. The structure of multiagent systems, mechanisms of interaction and forms of social organization of the agents are considered.

Keywords: automation of information-control functions, multiagent systems, collective conduct of agents, mechanisms of negotiations, design of programmed agent, ontology

Andreev M. V., Ivashchenko A. V., Martyshkin D. M., Skobelev P. O., Ulanova L. V., Tsarev A. V. Application of Multi-Agent Technology of Dynamic Scheduling of Personal Tasks at Organization of Collaborative Interaction in Automated Systems of Resources Distribution Management 21

The paper describes basic features and benefits of multi-agent technology application for dynamic scheduling of personal tasks of mobile users in automated systems of resources distribution management to provide collaborative interaction of decision makers.

Keywords: multi-agent systems, ontologies, collaborative interaction, dynamic scheduling

Osipov V. Yu. Direct and Invers Signal Transformation in Associative Intelligent Systems. 27

Direct and invers signal transformation approach analogize with biological processes is offered in associative intelligent systems (AIS). New structure requirements for AIS are formulated. Results of modeling are presented. Practical policies regarding the proposed approach are made.

Keywords: the associative intelligent system, neural network, signals, transformation

Filimonov A. B., Pokrovsky Ya. O. Electron Certification in Intellectual Control Systems by Technical State of Industrial Equipment. 32

Perspectives of use of electron document-rotation systems for industrial systems of technical service and maintenance, the possibilities of use of ontological engineering in the area of the electron certification of the technological equipment the principles of the intellectualization of control processes by technical state of the industrial equipment are discussed.

Keywords: control processes by technical state, technological equipment, electron certification, ontological engineering

Khizhnjakov Yu. N., Yuzhakov A. A. Brushless Synchronous Quasi-Static Characteristic Generator Parallel Operation Control in Polar Coordinate System 35

In article is considered method of quasi-static characteristics of brushless synchronous generator parallel operation control in off-line mode. The new types of block diagrams and control algorithms are designed. The main advantage of method is using a "forced" control, which provides hard maintenance of voltage and frequency. Also it allows getting uniform distribution of active and reactive power between brushless generators with 1–2 % offset level.

Keywords: brushless synchronous generator, relay-logical method, dynamical priority unit, detector, full stator current module sensors, active stator current sensors, threshold elements unit, polar coordinate system, control algorithm

Krivilev A. V. Mathematical Description of Digital Control System of Mechatronic Module of Actuator with Three-Phase Brushless DC Motor 40

The digital control system of the mechatronic module with the brushless dc motor is described. It allows to realize arbitrary method turning inverter keys on/off with different types and duration of the pulse-width modulation signal.

Keywords: mathematical model, digital control system, brushless dc motor, mechatronic module, control logic functions, logic variables, commutation method

Bobyр M. V., Titov V. S. Automated Control Systems Accuracy of Processing of Details with Usage of Methods of Fuzzy Logic 49

The method correction parameters of a mode cutting for the purpose of compensation of revolting effects influencing accuracy of turning processing of surfaces of details on the equipment from a NPC in real-time mode on the basis of fuzzy logic is considered. The example correction parameters of a mode of cutting on the basis of the fuzzy intervals, explaining an essence of operation of the given method is resulted. Work is executed with support grant of the President of Russian Federation MK-470.2009.8.

Keywords: correction parameters of a mode cutting, equipment with NPC, fuzzy logic, fuzzy interval

Lebedev G. N. Problem Formulation of Optimal Control in Manufacturing Processes to Provide Dynamic Stability of Industrial Production under Crisis Conditions 53

The problem of providing dynamic stability of industrial production under crisis conditions is considered. Optimal control of the technological processes provides careful reduction and expansion in production capacity at the periodically changing profitability.

Keywords: optimal control, varying profitability, dynamic stability

Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Grigoriev M. G. Synthesis the Automatic Rising and Leveling Algorithm of the Building Machine Basic Platform 56

The algorithm of the automatic leveling basic platform of building machines with remote, sliding or folding hydraulic legs, and maintain it at a given height in the process of the machine is offered. Algorithm allows to prevent the supports separation of the ground, attaching rod cylinders bearing on the maximum length, as well as the machine wheels touch the ground. This increases the supply of controllability angles platform.

Keywords: platform, leveling, building machine, alignment, separation of support

Lebedev G. N., Matveev M. G., Mihailov V. V., Semenov M. E. Aviation System Management, Stochastically Affected by Meteorological Factors 65

The method of task solving of optimal aviation system management, operative stochastically affected by meteorological factors, considered in this article.

Keywords: optimum control, meteorology, aviation systems, the decision-making theory

Borisenko Yu. G., Volodina L. A., Kasyanov I. Yu., Kuznetsov A. G. Main Principles of the Unified Creation Canals of Automatic Control of Airline on a Mode "Go-around" 69

In article main principles of the law of automatic control to flight in a longitudinal and lateral planes on a mode "Go-around", realized in developed in MIEA control systems CSCFT for modern civil airliners are stated.

Keywords: aviation, flight control system, landing and go-around

Kerber O. B., Mazur V. N., Tsururyan K. T. Specific Features of Instrument Landing System for Civil Aircrafts which Meet the Requirements of ICAO Category III 76

Specific features and major difficulties of the development of on-board equipment and control algorithms for instrument landing of civil aircrafts which meet the requirements of ICAO Category III are considered.

Keywords: instrument landing, variation problem, stochastic differential equations, nonlinear dynamics

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Е. В. Комиссарова.*

Сдано в набор 28.04.2010. Подписано в печать 24.06.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,52. Заказ 551. 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