

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 12 (105)

декабрь

2009

Редакционный совет:

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

Главный редактор:

ТЕРЯЕВ Е. Д.

Заместители гл. редактора:

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

Выпускающий редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:

ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

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

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Медведев М. Ю.** Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами 2
Сельвесюк Н. И. Численный алгоритм синтеза регуляторов заданной точности по выходу для многосвязных систем 9
Рогачев Г. Н. Использование гибридно-автоматного метода для описания систем автоматизации и управления 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Гоппе Г. Г.** Математические модели технологического комплекса электропривод—турбомеханизм—трубопроводная магистраль. Часть 2. Математические модели динамических процессов при управлении производительностью методом дросселирования 20
Прохоренко Е. В., Норбоев Б. Р. Разработка и исследование математической модели электромеханической системы синхронного вакуумного выключателя 25
Мяготин А. В. Тензорный метод как средство анализа процессов пенообразования в проекционных изображениях 30
Шестаков В. М., Епишкин А. Е., Нагин Г. В. Разработка и исследование системы стабилизации колебаний шестироторной вибрационной установки 35
Медведев Д. А., Осипов О. Ю., Осипов Ю. М., Щербинин С. В. Создание лазерных технологических комплексов по критерию цена/качество 41

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Тищенко А. С., Михайлов Б. Б.** Навигация мобильного робота на основе бортовой системы технического зрения 44

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

- Левин Д. Н., Пономаренко А. В., Сильвестров М. М.** Концептуальный облик и особенности построения диалоговых моделирующих комплексов и действующего макета кабины для эргономического сопровождения разработки эргатического информационно-управляющего комплекса перспективного многофункционального маневренного самолета 52
Грибков В. Ф., Корнеев Н. И., Шестопалов Е. В. Математическая модель бортовой радиолокационной станции для базы знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы 60
Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И. Особенности менеджмента качества и сертификации бортовых систем воздушных судов 66
Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2009 г. 73
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 681.513

М. Ю. Медведев, канд. техн. наук, доц.,
Технологический институт
Южного федерального университета, г. Таганрог
medv_mihal@rambler.ru

Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами

Рассматривается процедура синтеза замкнутых субоптимальных по быстродействию управлений многосвязными нелинейными динамическими системами, представленными в управляемой Жордановой форме. В предположении, что на управления и переменные состояния наложены ограничения, строится субоптимальный алгоритм управления для системы, состоящей из блоков, образующих Жорданову форму. Показано, что полученные управления удовлетворяют принципу максимума Понтрягина.

Ключевые слова: оптимальное по быстродействию управление, многосвязные нелинейные системы, грубость, принцип максимума.

Введение

Общие подходы к нахождению оптимального по быстродействию управления, как известно, базируются на принципе максимума Л. С. Понтрягина и методе динамического программирования [1–4]. В приведенных ссылках можно ознакомиться с основными результатами теории оптимального быстродействия, которые позволяют решать задачу программного оптимального по быстродействию управления для линейных объектов, нелинейных объектов, задачу построения оптимального управления в замкнутой системе. Однако даже в линейных системах порядка выше второго практическое решение задачи регулярного синтеза оптимального по быстродействию управления сталкивается с высокой сложностью используемых процедур. В нелинейном случае принцип максимума может применяться при определенных ограничениях как достаточное условие оптимальности только в ограниченной области пространства состояния [3].

В связи с этим актуальной задачей является нахождение таких процедур синтеза, которые позволяют свести решение задачи на оптимальное быстродействие к совокупности решений первого —

второго порядка. Такая процедура для случая нелинейных систем в управляемой Жордановой форме [5] с одним управляющим воздействием представлена в работе [6]. При этом полученное решение включает в себя ограничения на переменные состояния и область пространства состояния, для которой это решение является оптимальным в смысле быстродействия. Достоинством полученного в [6] релейного регулятора является грубость свойства оптимальности по отношению к правым частям дифференциальных уравнений объекта управления в пределах области управляемости в смысле Е. С. Пятницкого [7]. Основным ограничением на использование предложенного в [6] метода является представление управляемой системы в виде каскадов с разнотемповой динамикой, что обусловлено требованием мгновенных переключений управляющих воздействий при решении задач на оптимальное быстродействие.

В данной статье результаты [6] обобщаются на класс многосвязных нелинейных динамических систем, представленных в управляемой Жордановой форме.

Постановка задачи

Рассмотрим многосвязную нелинейную динамическую систему, которая описывается уравнениями вида

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f_i(x_i) + \mathbf{B}_i(x_i)x_{i+1}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_i = (x_1^i \ x_2^i \ \dots \ x_m^i)^T$ — подвекторы переменных состояния объекта размерности m , общая размерность вектора $m \times n$; $\mathbf{x}_{n+1} = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ — вектор управляющих воздействий размерности m ; $f_i(x_i) = (f_1^i(x_i) \ f_2^i(x_i) \ \dots \ f_m^i(x_i))$ — подвекторы функций переменных состояния размерности m , общая размерность вектора $m \times n$; $\mathbf{B}_i(x_i) = (b_{jk}^i(x_i))$ — матрица функциональных коэффициентов, $j = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, m}$.

Предположим, что для системы (1) выполнено условие общности положения [2]. Кроме того, огра-

ним область функционирования объекта управления следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} |f_j^i(\mathbf{x}_i)| &< |(b_j^i(\mathbf{x}_i), U_m^i)|, \\ f_j^i(0) &= 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $b_j^i(\mathbf{x}_i)$ — j -я строка матрицы $\mathbf{B}_i(\mathbf{x}_i)$; $U_m^i = (u_{\max 1}^i u_{\max 2}^i \dots u_{\max m}^i)^T$ — вектор постоянных положительных чисел; $(b_j^i(\mathbf{x}_i), U_m^i)$ — скалярное произведение векторов.

Требуется найти вектор управляющих воздействий $(u_1 u_2 \dots u_m)^T$ в виде функции переменных состояния системы (1) при ограничениях (2), который обеспечивает перевод объекта (1) из произвольного начального состояния в конечное состояние $\mathbf{x}_1 = 0$, доставляя минимум функционалу вида

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \int_{t_0}^t 1 dt. \quad (3)$$

Отметим, что поставленная задача приводит к разрывным управлениям, что практически не реализуемо. В связи с этим в данной работе рассматривается субоптимальное управление, которое отличается конечной скоростью переключения из одного состояния в другое.

Процедура синтеза многосвязного регулятора

В данной работе синтез оптимальной по быстродействию системы основывается на принципе максимума [1] и методе структурного синтеза многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами Л. М. Бойчука [8–10]. В дальнейшем этот подход получил развитие в работах А. А. Колесникова как метод аналитического синтеза агрегированных регуляторов [11, 12]. В зарубежной литературе он известен как метод бэкстеппинга [13].

Как известно, принцип максимума дает достаточно общую методику выделения оптимальных управлений. Однако основной сложностью данного метода является нахождение функции Гамильтона, в частности, входящих в нее неопределенных функций. Поэтому рассмотрим процедуру поэтапного формирования гамильтониана. По аналогии с положениями, изложенными в [8–12], введем в рассмотрение последовательность векторных многообразий вида

$$\varphi_i = \mathbf{x}_{i+1} - \gamma_{i+1}(\mathbf{x}_i) = 0, \quad i = \overline{n-1, 1}, \quad (4)$$

где $\gamma_i(\mathbf{x}_i)$ — векторные функции размерности m , определяемые в процедуре синтеза управлений.

При последовательном выполнении условий (4) можно рассматривать соответствующие последовательности декомпозированных систем пониженного порядка, получаемых из системы (1):

$$\frac{d\mathbf{x}_i(t)}{dt} = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{B}_i(\mathbf{x}_i)\gamma_{i+1}(\mathbf{x}_i), \quad i = \overline{m-1, 1}. \quad (5)$$

Рассмотрим систему (5) при $i = 1$:

$$\frac{d\mathbf{x}_1(t)}{dt} = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1) + \mathbf{B}_1(\mathbf{x}_1)\gamma_2(\mathbf{x}_1). \quad (6)$$

Запишем для системы (6) функцию Гамильтона следующего вида:

$$H^1 = \sum_{i=1}^m \left(\psi_i^1 \sum_{j=1}^m b_{ij}^1(\mathbf{x}_1) \gamma_j^2 \right) + \sum_{i=1}^m (\psi_i^1 f_i^1(\mathbf{x}_1)), \quad (7)$$

где

$$\psi_i^1 = -x_i^1. \quad (8)$$

Проверим соответствие функции (7) основным условиям общей теоремы принципа максимума, изложенным в [3] (теорема 3.10, с. 235). Условия (А) и (В) в [3] (теорема 3.10, с. 235) выполнены в силу уравнений (6), (7). Кроме того, легко проверить выполнение остальных условий:

$$\frac{\partial H^1}{\partial \psi_i^1} = f_i^1(\mathbf{x}_i) + \sum_{j=1}^m b_{ij}^1(\mathbf{x}_1) \gamma_j^2 = \frac{dx_i^1}{dt}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_i^1}{dt} &= -\frac{dx_i^1}{dt} = -f_i^1(\mathbf{x}_i) - \sum_{j=1}^m b_{ij}^1(\mathbf{x}_1) \gamma_j^2 = -\frac{\partial H^1}{\partial \psi_i^1}, \\ i &= \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (10)$$

Перегруппируем в (7) слагаемые относительно произвольных функций γ_j^2 :

$$\begin{aligned} H^1 &= \sum_{j=1}^m \left(\gamma_j^2 \sum_{i=1}^m (-\psi_i^1 b_{ij}^1(\mathbf{x}_1)) \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^m (-\psi_i^1 f_i^1(\mathbf{x}_i)). \end{aligned} \quad (11)$$

Выберем функции γ_j^2 таким образом, чтобы функция H^1 (11) достигала максимума. Очевидно,

что такая ситуация имеет место при выполнении следующих соотношений:

$$\gamma_j^2 = u_{\max j}^1 \operatorname{sign} \left[\sum_{i=1}^m (-\psi_i^1 b_{ij}^1(x_1)) \right]. \quad (12)$$

Легко проверить, что при выполнении (12) и ограничениях (2) для функции H^1 (7), (8) выполняется условие

$$H^1 > 0, \forall \|x_1\| > 0, \quad (13)$$

причем нуль выражение (13) может достигать только при нарушении неравенств (2). В целевой точке, которой соответствует начало координат, при выполнении условий (2) функция (7) равняется нулю. Таким образом, условия (D) и (E) в [3] (теорема 3.10, с. 235) также выполнены.

Выражение (12) определяет векторное многообразие φ_i (4) для $i = 1$. Дифференцируя по времени выражение (4) при $i = 1$ с учетом (12) во всех точках непрерывности функций φ_j , получаем

$$\frac{d\varphi_1(t)}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = f_2(x_2) + \mathbf{B}_2(x_2)\gamma_3(x_2). \quad (14)$$

Выражение (14) отличается от выражения (6) только индексами, поэтому приведенная выше процедура может быть без изменений повторена. В результате такой рекуррентной процедуры можно получить следующее выражение для подсистемы (14):

$$\begin{aligned} \gamma_j^3 &= u_{\max j}^2 \operatorname{sign} \sum_{i=1}^m (-x_i^2 + \gamma_i^2) b_{ij}^2(x_2) = \\ &= u_{\max j}^2 \operatorname{sign} \sum_{j=1}^m -\varphi_i^2 b_{ij}^2(x_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Продолжая аналогичную рекуррентную процедуру, можно получить следующую последовательность выражений, которая при $k = n$ определяет оптимальный регулятор для системы (1):

$$\begin{aligned} \gamma_j^{k+1} &= u_{\max j}^k \operatorname{sign} \sum_{i=1}^m -\varphi_i^k b_{ij}^k(x_k), \\ k &= \overline{2, n}, j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (16)$$

Отметим, что оптимальный регулятор (16) не содержит никакой информации о структуре и параметрах функций $f_i(x_i) = (f_1^i(x_i) f_2^i(x_i) \dots f_m^i(x_i))$, входящих в правые части уравнений управляемого объекта (1). Требуется только ограничение этих функций выражениями (2).

Частный случай синтеза

Рассмотрим частный случай синтеза многосвязной оптимальной системы управления для объекта, описываемого уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dx_1^1(t)}{dt} &= f_1^1(x_1^1, x_2^1) + \\ &+ b_{11}^1(x_1^1, x_2^1)x_1^2 + b_{12}^1(x_1^1, x_2^1)x_2^2; \\ \frac{dx_2^1(t)}{dt} &= f_2^1(x_1^1, x_2^1) + \\ &+ b_{21}^1(x_1^1, x_2^1)x_1^2 + b_{22}^1(x_1^1, x_2^1)x_2^2; \\ \frac{dx_1^2(t)}{dt} &= f_1^2(x_1^2, x_2^2) + \\ &+ b_{11}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{12}^2(x_1^2, x_2^2)u_2; \\ \frac{dx_2^2(t)}{dt} &= f_2^2(x_1^2, x_2^2) + \\ &+ b_{21}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{22}^2(x_1^2, x_2^2)u_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Будем предполагать, что выполнены ограничения (2). Для нахождения функции Гамильтона введем в рассмотрение следующие многообразия:

$$\begin{aligned} \varphi_1^1 &= x_1^2 - \gamma_1^1(x_1^1, x_2^1) = 0; \\ \varphi_2^1 &= x_2^2 - \gamma_2^1(x_1^1, x_2^1) = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

При выполнении условий (18) можно рассмотреть верхние два уравнения системы (17):

$$\begin{aligned} \frac{dx_1^1(t)}{dt} &= f_1^1(x_1^1, x_2^1) + \\ &+ b_{11}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_1^1 + b_{12}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_2^1; \\ \frac{dx_2^1(t)}{dt} &= f_2^1(x_1^1, x_2^1) + \\ &+ b_{21}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_1^1 + b_{22}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_2^1. \end{aligned} \quad (19)$$

Для системы (19) в соответствии с изложенной процедурой введем функцию следующего вида:

$$\begin{aligned} H^1 &= -x_1^1(b_{11}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_1^1 + b_{12}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_2^1) - \\ &- x_2^1(b_{21}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_1^1 + b_{22}^1(x_1^1, x_2^1)\gamma_2^1) - \\ &- x_1^1 f_1^1(x_1^1, x_2^1) - x_2^1 f_2^1(x_1^1, x_2^1) = \\ &= (-x_1^1 b_{11}^1(x_1^1, x_2^1) - x_2^1 b_{21}^1(x_1^1, x_2^1))\gamma_1^1 + \\ &+ (-x_1^1 b_{12}^1(x_1^1, x_2^1) - x_2^1 b_{22}^1(x_1^1, x_2^1))\gamma_2^1 - \\ &- x_1^1 f_1^1(x_1^1, x_2^1) - x_2^1 f_2^1(x_1^1, x_2^1). \end{aligned} \quad (20)$$

Из выражения (20) видим, что функция H^1 достигает максимума при следующих управляющих функциях:

$$\begin{aligned} \gamma_1^1 &= u_{\max 1}^1 \operatorname{sign}(-x_1^1 b_{11}^1(x_1^1, x_2^1) - x_2^1 b_{21}^1(x_1^1, x_2^1)); \\ \gamma_2^1 &= u_{\max 2}^1 \operatorname{sign}(-x_1^1 b_{12}^1(x_1^1, x_2^1) - x_2^1 b_{22}^1(x_1^1, x_2^1)). \end{aligned} \quad (21)$$

При выполнении ограничений (2) и условий (21) функция H^1 положительно определена и достигает нуля в целевой точке, которая в данном случае соответствует началу координат.

Перепишем выражения (18) с учетом (21) в виде

$$\begin{aligned} \phi_1^1 &= x_1^2 - u_{\max 1}^1 \operatorname{sign}(-x_1^1 b_{11}^1(x_1^1, x_2^1) - \\ &\quad - x_2^1 b_{21}^1(x_1^1, x_2^1)) = 0; \\ \phi_2^1 &= x_2^2 - u_{\max 2}^1 \operatorname{sign}(-x_1^1 b_{12}^1(x_1^1, x_2^1) - \\ &\quad - x_2^1 b_{22}^1(x_1^1, x_2^1)) = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Введем в рассмотрение следующую функцию Гамильтона для системы (17):

$$\begin{aligned} H^2 &= \psi_1^2 (b_{11}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{12}^2(x_1^2, x_2^2)u_2 + \\ &\quad + f_1^2(x_1^2, x_2^2)) - \psi_2^2 (b_{21}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + \\ &\quad + b_{22}^2(x_1^2, x_2^2)u_2 f_2^2(x_1^2, x_2^2)), \end{aligned} \quad (23)$$

где вспомогательные функции имеют вид

$$\begin{aligned} \psi_1^2 &= -\phi_1^1; \\ \psi_2^2 &= -\phi_2^1. \end{aligned} \quad (24)$$

Проверим соответствие функции Гамильтона (23) основным условиям общей теоремы принципа максимума, изложенным в [3] (теорема 3.10, с. 235). Условия (А) и (В) в [3] (теорема 3.10, с. 235) выполнены в силу уравнений (17), (23). Кроме того, легко проверить выполнение остальных условий:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H^2}{\partial \psi_1^2} &= (b_{11}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{12}^2(x_1^2, x_2^2)u_2 + \\ &\quad + f_1^2(x_1^2, x_2^2)) = \frac{dx_1^2}{dt}; \\ \frac{\partial H^2}{\partial \psi_2^2} &= (b_{21}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{22}^2(x_1^2, x_2^2)u_2 + \\ &\quad + f_2^2(x_1^2, x_2^2)) = \frac{dx_2^2}{dt}; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1^2(t)}{dt} &= -\frac{dx_1^2}{dt} = -f_1^2(x_1^2, x_2^2) - \\ &\quad - b_{11}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 - b_{12}^2(x_1^2, x_2^2)u_2 = -\frac{dH^2}{dx_1^2}; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_2^2(t)}{dt} &= -\frac{dx_2^2}{dt} = -f_2^2(x_1^2, x_2^2) - \\ &\quad - b_{21}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 - b_{22}^2(x_1^2, x_2^2)u_2 = -\frac{dH^2}{dx_2^2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Подставим (24) в (23) и перегруппируем слагаемые. В результате получим

$$\begin{aligned} H^2 &= -\phi_1^1 (b_{11}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{12}^2(x_1^2, x_2^2)\gamma_2^1) - \\ &\quad - \phi_2^1 (b_{21}^2(x_1^2, x_2^2)u_1 + b_{22}^2(x_1^2, x_2^2)u_2) - \\ &\quad - x_1^2 f_1^2(x_1^2, x_2^2) - x_2^2 f_2^2(x_1^2, x_2^2) = \\ &= (-\phi_1^1 b_{11}^2(x_1^2, x_2^2) - \phi_2^1 b_{21}^2(x_1^2, x_2^2))u_1 + \\ &\quad + (-\phi_1^1 b_{12}^2(x_1^2, x_2^2) - \phi_2^1 b_{22}^2(x_1^2, x_2^2))u_2 - \\ &\quad - x_1^2 f_1^2(x_1^2, x_2^2) - x_2^2 f_2^2(x_1^2, x_2^2). \end{aligned} \quad (28)$$

Из (28) получаем выражения для управлений, доставляющих максимум функции H^2 :

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{\max 1}^2 \operatorname{sign}(-\phi_1^1 b_{11}^2(x_1^2, x_2^2) - \\ &\quad - \phi_2^1 b_{21}^2(x_1^2, x_2^2)); \\ u_2 &= u_{\max 2}^2 \operatorname{sign}(-\phi_1^1 b_{12}^2(x_1^2, x_2^2) - \\ &\quad - \phi_2^1 b_{22}^2(x_1^2, x_2^2)). \end{aligned} \quad (29)$$

При выполнении ограничений (2) и при управлениях (29) функция H^2 (28) положительная и достигает нуля в целевом состоянии.

Таким образом, выражения (29) описывают многосвязный релейный регулятор, обеспечивающий максимум положительной функции H^2 (28) в ограниченной области (2) пространства состояния системы (17), что позволяет говорить об оптимальном по быстродействию управлении.

Отметим важный факт, что функции (24) являются решениями (26), (27), строго говоря, только в точках непрерывности функций (21). Если учитывать тот факт, что оптимальное управление на практике не реализуется из-за невозможности мгновенных переключений управляющих воздействий, то необходимо использовать какую-либо аппроксимацию знаковой функции.

Выберем в качестве такой аппроксимации функцию $\tanh(l^*)$, где l — константа, приближающая функцию гиперболического тангенса к знаковой функции, а $*$ — аргумент функции \tanh . В этом случае выражения (22), (26), (27) и (29) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \varphi_1^1 &= x_1^2 - u_{\max 1}^1 \tanh[l(-x_1^1 b_{11}^1(x_1^1, x_2^1) - \\ &\quad - x_2^1 b_{21}^1(x_1^1, x_2^1))] = 0; \\ \varphi_2^1 &= x_2^2 - u_{\max 2}^1 \tanh[l(-x_1^1 b_{12}^1(x_1^1, x_2^1) - \\ &\quad - x_2^1 b_{22}^1(x_1^1, x_2^1))] = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1^2(t)}{dt} &= -\frac{\partial H^2}{\partial x_1^2}; \\ \frac{d\psi_2^2(t)}{dt} &= -\frac{\partial H^2}{\partial x_2^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{\max 1}^2 \tanh[l(-\varphi_1^1 b_{11}^2(x_1^2, x_2^2) - \\ &\quad - \varphi_2^1 b_{21}^2(x_1^2, x_2^2))]; \\ u_2 &= u_{\max 2}^2 \tanh[l(-\varphi_1^1 b_{12}^2(x_1^2, x_2^2) - \\ &\quad - \varphi_2^1 b_{22}^2(x_1^2, x_2^2))]. \end{aligned} \quad (32)$$

Выражения (30), (32) описывают субоптимальный многосвязный регулятор для системы (17), а переменные (24) удовлетворяют выражениям (31) на всем интервале времени. Субоптимальные управления, вычисленные по (32), отличаются от оптимальных в областях переключений.

Для субоптимального управления рассмотрим следующую квадратичную функцию:

$$V = \frac{1}{2}(\varphi_1^1)^2 + \frac{1}{2}(\varphi_2^1)^2. \quad (33)$$

Вычислим производную по времени от функции (33) с учетом уравнений замкнутой системы (17), (32):

$$\frac{dV}{dt} = -H^2, \quad (34)$$

где функция H^2 определяется выражением (28).

Учитывая, что функция H^2 (28) положительно определена при ограничениях (2), получаем, что выражение (33) определяет функцию Ляпунова, а замкнутая система (17), (32) является асимптотически устойчивой.

Примеры синтеза

Пример 1. Рассмотрим демонстрационный пример синтеза многосвязного релейного регулятора для следующей системы:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= b_{11}u_1 + b_{12}u_2; \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= b_{21}u_1 + b_{22}u_2, \end{aligned} \quad (35)$$

где $x_1(t)$, $x_2(t)$ — переменные состояния; u_1 , u_2 — управляющие воздействия, удовлетворяющие ограничениям $|u_1| \leq u_{\max 1}$, $|u_2| \leq u_{\max 2}$; b_{11} , b_{12} , b_{21} , b_{22} — постоянные параметры.

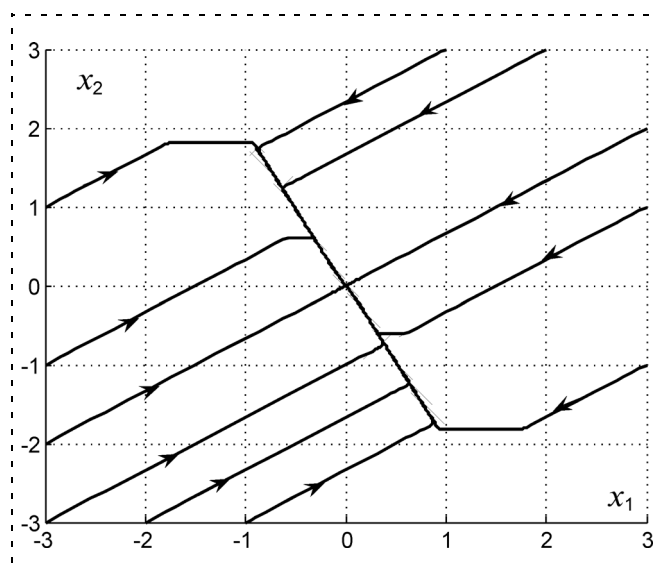


Рис. 1. Фазовый портрет замкнутой системы (35), (36)

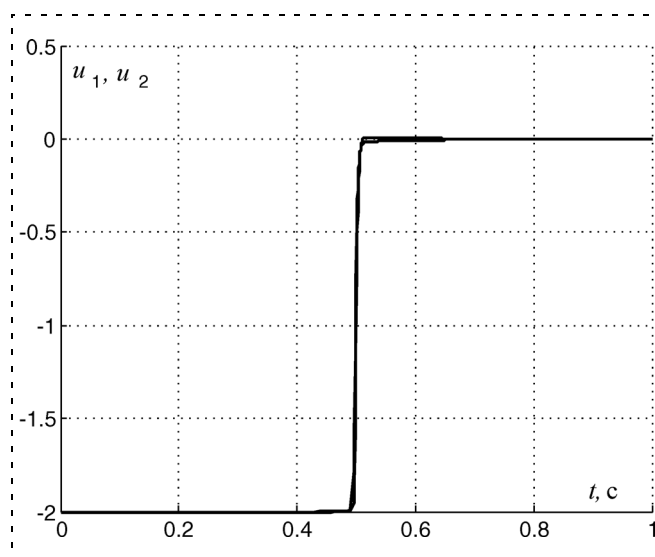


Рис. 2. Управляющие воздействия замкнутой системы (35), (36) для начальных условий $x_1(0) = 3$, $x_2(0) = 2$

Применение описанной выше процедуры синтеза приводит к следующему векторному регулятору:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{\max 1} \operatorname{sign}(-x_1 b_{11} - x_2 b_{21}); \\ u_2 &= u_{\max 2} \operatorname{sign}(-x_1 b_{12} - x_2 b_{22}). \end{aligned} \quad (36)$$

Результаты моделирования замкнутой системы (35), (36) приведены на рис. 1 и 2. При моделировании знаковая функция $\operatorname{sign}(\ast)$ заменена на функцию $\tanh(l\ast)$, где l — константа, приближающая функцию гиперболического тангенса к знаковой функции. Параметры системы при моделировании: $b_{11} = 2$, $b_{12} = 1$, $b_{21} = 1$, $b_{22} = 1$, $|u_1| \leq 2$, $|u_2| \leq 2$, $l = 30$. Это позволяет устранить случайные флуктуации управлений под действием погрешностей вблизи линии переключений.

Пример 2. Рассмотрим пример синтеза многосвязного релейного регулятора для колесной платформы, уравнения которой могут быть представлены в виде следующей системы уравнений [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= \omega_l \alpha_{11}(\varphi) + \omega_r \alpha_{12}(\varphi); \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= \omega_l \alpha_{21}(\varphi) + \omega_r \alpha_{22}(\varphi); \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{r}{2b} (\omega_r - \omega_l); \\ \frac{d\omega_l(t)}{dt} &= -d_1 \omega_l + b_{11} u_1 + b_{12} u_2; \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} &= -d_2 \omega_r + b_{21} u_1 + b_{22} u_2, \end{aligned} \quad (38)$$

где x_1 , x_2 — внешние координаты платформы;
 φ — угол ориентации платформы относительно горизонтальной оси;

ω_l , ω_r — угловые скорости вращения колес платформы, удовлетворяющие ограничениям $|\omega_l| \leq \omega_{\max}$, $|\omega_r| \leq \omega_{\max}$;

$$\alpha_{11}(\varphi) = 0,5r\omega_l(\cos \varphi + a \sin \varphi);$$

$$\alpha_{12}(\varphi) = 0,5r\omega_l(\cos \varphi - a \sin \varphi);$$

$$\alpha_{21}(\varphi) = 0,5r\omega_l(\sin \varphi - a \cos \varphi);$$

$$\alpha_{22}(\varphi) = 0,5r\omega_l(\sin \varphi + a \cos \varphi);$$

r — радиус колес;

a — кинематический параметр шасси;

d_i , b_{ij} , $i = 1, 2$, $j = 1, 2$, — постоянные параметры, зависящие от постоянных времени двигателей, приведенных массы и момента инерции шасси, кинематики шасси и радиуса колес;

u_1 , u_2 — управляющие воздействия, удовлетворяющие ограничениям $|u_1| \leq u_{\max 1}$, $|u_2| \leq u_{\max 2}$.

Уравнения (37) описывают кинематику платформы, а (38) — динамику. Поставим задачу попадания в начало координат $x_1 = 0$, $x_2 = 0$ из произвольного начального состояния $x_1(0)$, $x_2(0)$ без предъявления требований к ориентации платформы в пространстве.

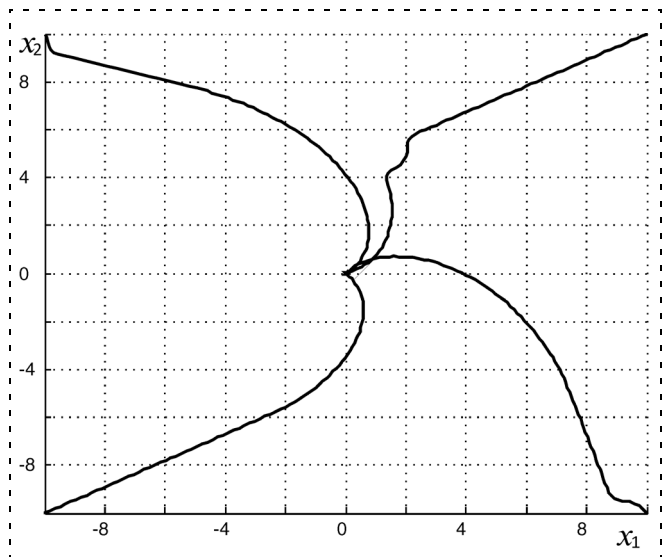


Рис. 3. Проекция фазового портрета замкнутой системы (37)–(40)

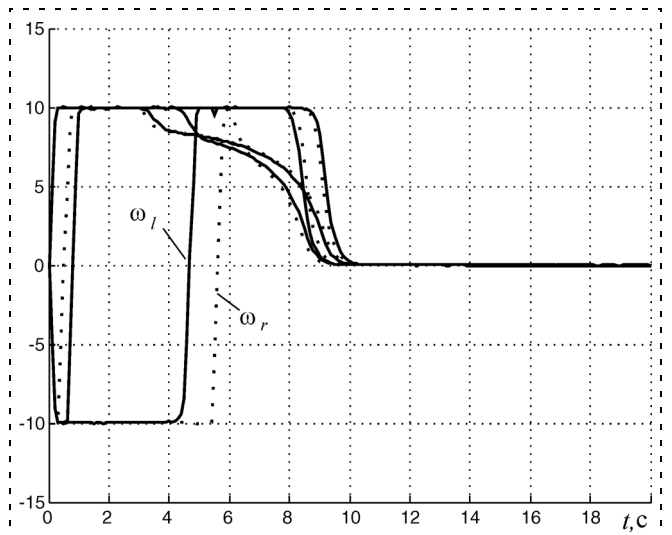


Рис. 4. Изменение угловых скоростей замкнутой системы (37)–(40)

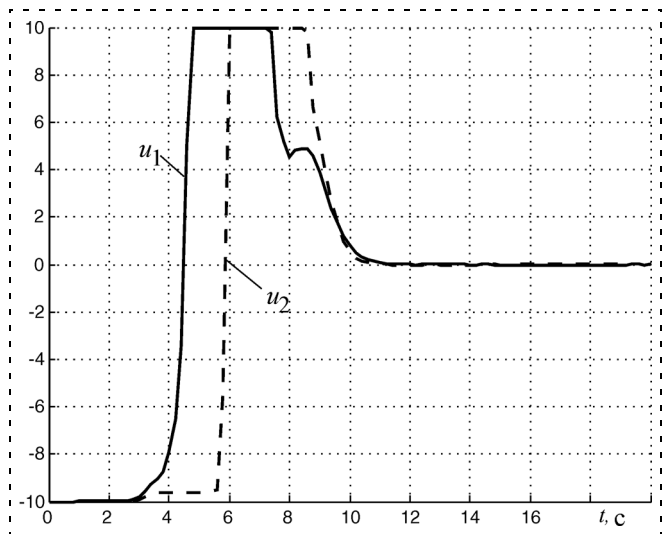


Рис. 5. Изменение управляющих воздействий замкнутой системы (37)–(40)

В соответствии с описанной выше процедурой многосвязный релейный регулятор для системы (37), (38) определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{\max 1} \operatorname{sign}(-\varphi_1 b_{11} - \varphi_2 b_{21}); \\ u_2 &= u_{\max 2} \operatorname{sign}(-\varphi_1 b_{12} - \varphi_2 b_{22}); \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \omega_l - \omega_{\max} \operatorname{sign}(-x_1 \alpha_{11}(\varphi) - x_2 \alpha_{21}(\varphi)); \\ \varphi_2 &= \omega_r - \omega_{\max} \operatorname{sign}(-x_1 \alpha_{12}(\varphi) - x_2 \alpha_{22}(\varphi)). \end{aligned} \quad (40)$$

Результаты моделирования замкнутой системы (37)–(40), показанные на рис. 3–5, получены при следующих параметрах: $u_{\max 1} = u_{\max 2} = 10$, $\omega_{\max} = 10$, $r = 0,2$, $a = 1$, $d_1 = d_2 = 1$, $b_{11} = b_{22} = 1$, $b_{12} = b_{21} = 0$. Как и в предыдущем случае, знаковая функция sign^* заменена на функцию $\tanh(l^*)$, где $l = 10$.

Заключение

В статье предложена процедура синтеза многосвязных нелинейных динамических систем, представленных в управляемой Жордановой форме, обеспечивающая выполнение принципа максимума Л. С. Понтрягина при ограничениях на управляющие воздействия и координаты состояния. В результате применения предложенной процедуры получаемые регуляторы обеспечивают грубость по отношению к структуре и параметрам функций $f_i^i(x_j) = (f_1^i(x_j) f_2^i(x_j) \dots f_m^i(x_j))$, $i = \overline{1, n}$, входящих в правые части объекта управления (1), если выполнены ограничения (2). Кроме того, обеспечивается асимптотическая устойчивость в заданной области пространства состояния, что показано на основе метода функций Ляпунова.

Список литературы

1. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961.
2. Олейников В. А., Зотов Н. С., Пришвин А. Н. Основы оптимального и экстремального управления. Учеб. пособ. для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1969.
3. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969.
4. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Изд. 2-е. М.: Наука, 1966.
5. Гайдук А. Р. Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // Автоматика и телемеханика. 2006. № 7. С. 3–13.
6. Медведев М. Ю. Синтез замкнутых оптимальных по быстродействию управлений каскадными нелинейными динамическими системами с ограничениями на координаты // Мехатроника, автоматизация и управление. № 7. 2009. С. 2–6.
7. Пятницкий Е. С. Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. 1996. № 12. С. 29–37.
8. Бойчук Л. М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. М.: Энергия, 1971.
9. Бойчук Л. М. Структурный синтез автоматических многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами. Препринт 74-23. Киев: Изд-во Института кибернетики АН УССР, 1974.
10. Бойчук Л. М. Синтез координирующих систем автоматического управления. М.: Энергоатомиздат, 1991.
11. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
12. Современная прикладная теория управления. Синергетический подход в теории управления. Ч. 2 / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
13. Kokotović P. V., Arcak M. Constructive nonlinear control: progress in the 90's // Proceedings of 14th IFAC World Congress. Beijing, China, 1999. Paper No PT-4. P. 49–77.
14. Девянин Е. А. О движении колесных роботов // Докл. Науч. школы-конференции "Мобильные роботы и мехатронные системы". М.: Институт механики МГУ, 1999. С. 169–200.

С 17 по 19 марта 2010 г. в Москве в СК "Олимпийский" состоится Международная выставка и конференция



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Традиционно одновременно с выставкой NDT проходят международные выставки:



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ



ЛАБОРАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Дополнительная информация:

Тел.: +7 (812) 380 6002 Факс: +7 (812) 380 6001
E-mail: ndt@primexpo.ru
www.ndt-russia.ru www.meratek.ru

Н. И. Сельвесюк, д-р техн. наук, зам. нач. кафедры,
Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
Москва
selvesyuk@yandex.ru

Численный алгоритм синтеза регуляторов заданной точности по выходу для многосвязных систем¹

Описана методика синтеза регуляторов по выходу для многосвязных линейных стохастических систем, обеспечивающих заданные требования к точности регулируемых параметров. Указанные требования формулируются через диагональные элементы ковариационной матрицы замкнутой системы. Для определения достижимой ковариационной матрицы используется численный алгоритм, основанный на решении системы матричных линейных неравенств. Приведен методический пример.

Ключевые слова: линейная стохастическая система, ковариационная матрица, канонизация матриц, регулятор заданной точности по выходу, линейное матричное неравенство.

Введение. В работах автора [1, 2] предложен метод синтеза регуляторов в обратной связи для линейных стохастических многосвязных систем. Целью синтеза является стабилизация системы и обеспечение заданной точности управления по отдельным параметрам объекта при действии широкополосных возмущений. Требования к точности управления формулируются через значения дисперсий регулируемых выходов и формализуются через диагональные элементы ковариационной матрицы замкнутой устойчивой системы. Предложенный метод синтеза позволяет обеспечить заданное значение каждой из регулируемых величин в отдельности, что затруднительно осуществить с помощью оптимизационных методов синтеза.

Предложенный подход базируется на результатах технологии вложения систем и канонизации матриц [3]. Это позволяет получить основные расчетные соотношения для регуляторов заданной точности в аналитическом виде. Однако проверка условий разрешимости задачи синтеза требует привлечения численных методов решения матричных тождеств для формирования *достижимой ковариационной матрицы*, которая может быть обеспечена регулятором в обратной связи в системе с данными параметрами.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МД-235.2008.8.

При решении задачи синтеза регуляторов по состоянию условия разрешимости имеют вид линейных матричных уравнений [2]. Для их решения относительно неизвестной симметричной положительно определенной матрицы предложен ряд эффективных численных [4], аналитических [5] и полуаналитических [6] методов.

Однако условия разрешимости для синтеза регуляторов по выходу имеют более сложный вид. Они представляют собой систему линейных и нелинейных (квадратичных) матричных уравнений с взаимнообратными матрицами. В прямой постановке методов решения подобных систем уравнений не существует. При решении данной задачи возникают две вычислительные проблемы. Первая связана с наличием системы нелинейных уравнений, решение которой само по себе затруднительно. Вторая заключается в определении взаимнообратных матриц. Подобная структура условий разрешимости имеет место в задачах синтеза регуляторов по выходу и в других методах синтеза, например, в задачах H_2 и H_{inf} оптимизации [7].

Для решения первой проблемы предлагается использовать аппарат линейных матричных неравенств, который позволяет избавиться от нелинейностей. При этом эффективным инструментом решения таких неравенств является пакет LMI Control Toolbox системы Matlab [8]. Для решения второй проблемы, которая известна в теории управления как Dual LMI Problem, в настоящее время предложен ряд численных алгоритмов [9–11], из которых выбран алгоритм XYCA (XY Centering Algorithm) [11].

Таким образом, задача достижимости решается с использованием стандартных проверенных численных процедур, свойства которых хорошо изучены.

Постановка задачи. Модель линейной стохастической многомерной системы в пространстве состояний описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_x \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_x \mathbf{u}(t) + \mathbf{G}_x \mathbf{w}(t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_x \mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t) = \mathbf{D}_x \mathbf{x}(t),$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_x}$ — вектор состояния объекта с начальным состоянием \mathbf{x}_0 ; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_u}$ — вектор управления; $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{n_w}$ — вектор возмущений; $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{n_y}$ — измеряемый выход; $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n_z}$ — регулируемый выход; \mathbf{A}_x , \mathbf{B}_x , \mathbf{G}_x , \mathbf{C}_x , \mathbf{D}_x — вещественные числовые матрицы соответствующих размеров. Пара матриц $(\mathbf{A}_x, \mathbf{G}_x)$ является полностью управляемой, пара $(\mathbf{A}_x, \mathbf{B}_x)$ —

стабилизируемой, пара $(\mathbf{A}_x, \mathbf{C}_x)$ — полностью наблюдаемой.

Случайные возмущения представляют собой стационарные гауссовские случайные процессы с заданными спектральными плотностями. Учет спектрального состава возмущений осуществляется с помощью формирующих фильтров, включаемых в состав модели объекта (1). На вход фильтров подается белый шум с заданной ненулевой интенсивностью $M\{\mathbf{w}(t)\mathbf{w}^T(t)\} = \mathbf{Q}_x > 0$, где M — символ математического ожидания.

Рассматривается синтез динамического регулятора по измеряемому выходу с моделью в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}(t) &= \mathbf{A}_v \mathbf{v}(t) + \mathbf{B}_v \mathbf{y}(t), \\ \mathbf{u}(t) &= \mathbf{C}_v \mathbf{v}(t) + \mathbf{D}_v \mathbf{y}(t), \quad \mathbf{v}(t_0) = \mathbf{v}_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{v} \in \mathcal{R}^{n_v}$ — вектор состояния регулятора с начальным состоянием \mathbf{v}_0 ; $\mathbf{A}_v, \mathbf{B}_v, \mathbf{C}_v, \mathbf{D}_v$ — вещественные числовые матрицы.

Модель замкнутой системы (1) с регулятором (2) в обратной связи для объединенных векторов состояния $\mathbf{x}_\Sigma(t) = [\mathbf{x}(t) \ \mathbf{v}(t)]^T$ и возмущений $\mathbf{w}_\Sigma(t) = [\mathbf{w}(t) \ \mathbf{w}(t)]^T$ представляется в блочном виде

$$\dot{\mathbf{x}}_\Sigma(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{x}_\Sigma(t) + \mathbf{G}\mathbf{w}_\Sigma(t), \quad (3)$$

где числовые блочные матрицы имеют значения

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{n_v} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_x & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{n_v} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_x & 0 \\ \mathbf{E}_{n_v \times 2n_w} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = - \begin{bmatrix} \mathbf{D}_v & \mathbf{C}_v \\ \mathbf{B}_v & \mathbf{A}_v \end{bmatrix}; \quad (5)$$

\mathbf{E} — матрица размерности, формализующая множество стабилизирующих регуляторов, $\text{rank} \mathbf{E} = n_v^E$ [12].

Представление замкнутой системы (1)—(2) в форме блочной модели (3)—(5) позволяет унифицировать алгоритмы синтеза управления и в общем случае свести задачу синтеза динамических регуляторов низкого порядка к задаче синтеза стационарных регуляторов по измеряемому выходу.

Требования к точности управления задаются в виде ограничений на значения дисперсий регулируемых параметров и формализуются через диа-

гональные элементы соответствующей ковариационной матрицы:

$$\begin{aligned} M\{z_i^2(t)\} &= \sigma_{z_i}^2 \leq \gamma_i, \quad i = \overline{1, n_z}, \quad \sigma_z^2 = \text{diag}(\mathbf{DPD}^T), \\ \mathbf{D} &= [\mathbf{D}_x \ 0_{n_x \times n_v}]. \end{aligned}$$

Здесь $\gamma_i > 0$ — заданная величина, определяемая физическим содержанием задачи; \mathbf{P} — ковариационная матрица замкнутой системы (3) в установившемся режиме, удовлетворяющая уравнению Ляпунова

$$(\mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} + \mathbf{BK})^T + \mathbf{Q} = 0, \quad \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0. \quad (6)$$

Задача синтеза управления заключается в формировании достижимой ковариационной матрицы системы \mathbf{P} и нахождении структурной матрицы регулятора \mathbf{K} , совместно удовлетворяющих уравнению (6). В статье предложен численный алгоритм решения первой части задачи синтеза.

Синтез регуляторов заданной точности. Аналитическое решение задачи синтеза при использовании регуляторов по состоянию приведено в работе [2] и сформулировано ниже в виде двух лемм.

Лемма 1. Заданная ковариационная матрица состояния $\mathbf{P} > 0$ замкнутой системы (3) является достижимой с помощью динамического регулятора порядка $n_v \leq n_v^E$ по измеряемому выходу в обратной связи, если и только если выполняются условия

$$\bar{\mathbf{B}}^L (\mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T) (\bar{\mathbf{B}}^L)^T = 0; \quad (7)$$

$$(\bar{\mathbf{C}}^R)^T (\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P}^{-1} + \mathbf{P}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T\mathbf{P}^{-1}) \bar{\mathbf{C}}^R = 0. \quad (8)$$

Лемма 2. Все множество структурных матриц \mathbf{K} стабилизирующих динамических регуляторов по измеряемому выходу, обеспечивающих заданное значение достижимой ковариационной матрицы состояния $\mathbf{P} > 0$, определяется формулой

$$\{\mathbf{K}\}_{\eta, \varphi, \rho} = \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{P}(\mathbf{H} + \eta)\tilde{\mathbf{C}} + \bar{\mathbf{B}}^R \varphi + \rho \bar{\mathbf{C}}^L, \quad (9)$$

где матрица \mathbf{H} определяется формулой

$$\mathbf{H} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{A} + \frac{1}{2}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T\mathbf{P}^{-1};$$

η — любая из множества кососимметрических матриц

$$\{\eta\}_\kappa = \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{N} - \mathbf{N}^T(\tilde{\mathbf{R}})^T + \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{R}\mathbf{N}^T(\tilde{\mathbf{R}})^T + \bar{\mathbf{R}}^R \kappa (\bar{\mathbf{R}}^R)^T;$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{B}}^L \mathbf{P} \\ (\bar{\mathbf{C}}^R)^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{B}}^L \mathbf{P} \mathbf{H} \\ (\bar{\mathbf{C}}^R)^T \mathbf{H}^T \end{bmatrix};$$

Φ, ρ — произвольные матрицы подходящих размеров; $\kappa = -\kappa^T$ — произвольная кососимметрическая матрица подходящего размера.

Здесь и далее обозначения $\bar{\mathbf{M}}^L, \bar{\mathbf{M}}^R, \tilde{\mathbf{M}} = \tilde{\mathbf{M}}^R \tilde{\mathbf{M}}^L$ означают левый и правый делители нуля и сводный канонизатор матрицы $\mathbf{M}_{n \times m}$ соответственно и удовлетворяют тождеству [3]

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}^L \\ \bar{\mathbf{M}}^L \end{bmatrix} \mathbf{M} [\tilde{\mathbf{M}}^R \ \bar{\mathbf{M}}^R] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_r & 0_{r \times (n-r)} \\ 0_{(m-r) \times r} & 0_{(m-r) \times (n-r)} \end{bmatrix};$$

$$r = \text{rank} \mathbf{M}; n = n_x + n_y; m = n_u + n_v;$$

\mathbf{I}_r — единичная матрица.

Решение задачи достижимости. Условие достижимости (7) является линейной функцией матрицы \mathbf{P} , поэтому его проверка не составляет труда. Для этого могут быть использованы численные методы выпуклой оптимизации, итерационные рекурсивные алгоритмы в целях последовательного снижения порядка модели, либо аналитические методы решения алгебраических уравнений. Особенности реализации данных методов и их свойства исследованы в соответствующих работах [4–6].

В тождестве (8) выполним замену

$$\mathbf{S} = \mathbf{P}^{-1}, \quad (10)$$

получим нелинейное уравнение

$$(\bar{\mathbf{C}}^R)^T (\mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S}\mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T \mathbf{S}) \bar{\mathbf{C}}^R = 0 \quad (11)$$

с квадратичной составляющей относительно искомой матрицы $\mathbf{S} = \mathbf{S}^T > 0$.

Решение уравнения (11) требует применения нелинейных методов оптимизации либо, учитывая квадратичный характер функции, методов полуопределенного программирования [13]. Известными недостатками этих методов являются отсутствие гарантированной сходимости и зависимость результата от выбора начальной точки оптимизации.

Запишем (10) в виде уравнения

$$\mathbf{P}\mathbf{S} = \mathbf{I}. \quad (12)$$

Таким образом, задача достижимости представляет собой решение системы матричных уравнений (7), (11)–(12). Каждое из них в отдельности имеет свои численные методы решения, что затрудняет решение системы в целом. Для построения единого численного алгоритма решения задачи достижимости предлагается использовать аппарат линейных матричных неравенств (LMI). Мощные численные процедуры решения данных неравенств содержит пакет LMI Control Toolbox системы Matlab.

Для использования предлагаемого подхода решение матричного уравнения вида $F(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} = \mathbf{X}^T$ заменяется решением линейных матричных неравенств вида $F(\mathbf{X}) < 0$ при заданных на основе требований точности ограничениях на диагональные элементы искомой симметричной невырожденной матрицы.

Для составления матричных неравенств и преобразования квадратичной формы в линейную используется лемма Шура [3], согласно которой симметричное неравенство в блочной форме с квадратными диагональными блоками

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{12}^T & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} > 0$$

выполняется тогда и только тогда, когда

$$\mathbf{M}_{22} > 0; \mathbf{M}_{11} - \mathbf{M}_{12} \mathbf{M}_{22}^{-1} \mathbf{M}_{12}^T > 0.$$

Тогда уравнению (7) с учетом блочной структуры матриц (4) соответствуют линейные матричные неравенства

$$F_1(\mathbf{P}) \triangleq [\bar{\mathbf{B}}_x^L \ 0] \begin{bmatrix} \mathbf{P} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{B}}_x^L)^T \\ 0 \end{bmatrix} > 0; \quad (13)$$

$$\mathbf{P} > \alpha \mathbf{I}. \quad (14)$$

Дополнительное условие (14), где $\alpha > 0$ — малый скаляр, используется в численном алгоритме для получения нетривиального решения задачи достижимости.

Для учета ограничений на диагональные элементы ковариационной матрицы \mathbf{P} , формализующих требования к точности управления, вводится дополнительная система матричных неравенств вида

$$[\mathbf{D}\mathbf{P}\mathbf{D}]_{ii} \leq \gamma_i, \quad i = \overline{1, n_z}. \quad (15)$$

Таким образом, множество достижимости, соответствующее условию (7), описывается следующим образом:

$$\Phi(\mathbf{P}) \triangleq \{\mathbf{P}: F_1(\mathbf{P}) > 0, \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > \alpha \mathbf{I},$$

$$[\mathbf{D}\mathbf{P}\mathbf{D}]_{ii} \leq \gamma_i, \quad i = \overline{1, n_z}\}. \quad (16)$$

Нелинейному уравнению (11) соответствуют линейные матричные неравенства

$$F_2(\mathbf{S}) \triangleq [(\bar{\mathbf{C}}_x^R)^T \ 0] \begin{bmatrix} \mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{S} & \mathbf{S}\mathbf{G} \\ \mathbf{G}^T \mathbf{S} & -\mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_x^R \\ 0 \end{bmatrix} < 0; \quad (17)$$

$$\mathbf{S} > \alpha \mathbf{I}. \quad (18)$$

Соответствующее множество достижимости описывается следующим образом:

$$\Gamma(\mathbf{S}) \triangleq \{\mathbf{S}: F_2(\mathbf{S}) < 0, \mathbf{S} = \mathbf{S}^T > \alpha \mathbf{I}\}. \quad (19)$$

Для численной реализации тождества (12) его можно заменить неравенством $\mathbf{P} \geq \mathbf{S}^{-1} > 0$ или в блочной форме —

$$F_3(\mathbf{P}, \mathbf{S}) \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \geq 0. \quad (20)$$

Соответствующее множество имеет вид

$$E(\mathbf{P}, \mathbf{S}) \triangleq \{(\mathbf{P}, \mathbf{S}): F_3(\mathbf{P}, \mathbf{S}) \geq 0\}. \quad (21)$$

Теперь общую задачу достижимости, сформулированную леммой 1, можно записать следующим образом. Необходимо найти две взаимнообратные матрицы \mathbf{P} и \mathbf{S} размерности $(n_x + n_y) \times (n_x + n_y)$, которые принадлежат выпуклому множеству

$$\Omega(\mathbf{P}, \mathbf{S}) \triangleq \{(\mathbf{P}, \mathbf{S}): \mathbf{P} \in \Phi(\mathbf{P}), \mathbf{S} \in \Gamma(\mathbf{S}), (\mathbf{P}, \mathbf{S}) \in E(\mathbf{P}, \mathbf{S})\}. \quad (22)$$

Решение каждой задачи достижимости (16), (19) и (21) в отдельности может быть эффективно осуществлено с использованием функции *feasp* пакета LMI Control Toolbox системы Matlab. Однако для строгого выполнения условия (12) необходимо определить граничные точки множества $\Omega(\mathbf{P}, \mathbf{S})$. Решение данной задачи возможно с использованием минимаксного подхода. Соответствующая задача минимизации имеет вид

$$\lambda^* = \min\{\lambda_{\max}(\mathbf{PS}): (\mathbf{P}, \mathbf{S}) \in \Omega\}, \quad (23)$$

где $\lambda(\mathbf{PS})$ — собственные числа произведения матриц \mathbf{PS} .

Очевидно, что задача достижимости, сформулированная леммой 1, будет разрешима тогда и только тогда, когда $\lambda^* = 1$.

Трудность решения задачи (23) обусловлена тем, что она является невыпуклой по отношению к целевой функции $\lambda_{\max}(\mathbf{PS})$. Данная задача известна в теории управления как Dual LMI Problem. В настоящее время для ее решения предложен ряд численных алгоритмов [9—11]. Здесь предлагается использовать алгоритм ХУСА (XY Centering Algorithm), описанный в работе [11], так как он легко реализуется с помощью пакета LMI Control Toolbox.

Алгоритм содержит следующие шаги:

1) задается параметр $0 < \theta < 1$;

2) определяются начальные значения матриц $(\widehat{\mathbf{P}}, \widehat{\mathbf{S}}) \in \Omega$ с помощью функции *feasp*. Назначается $i = 1$ и

$$\mathbf{S}_1 = \widehat{\mathbf{S}}, \beta_1 > \lambda_{\max}(\widehat{\mathbf{P}} \widehat{\mathbf{S}});$$

3) вычисляется "аналитический центр" матрицы \mathbf{P}_i и параметр α_i :

$$\mathbf{P}_i = \text{ac}\{\mathbf{I} < \mathbf{S}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{S}_i^{1/2} < \beta_i \mathbf{I}, \mathbf{P} \in \Phi\}, \\ \alpha_i = (1 - \theta)\lambda_{\max}(\mathbf{P}_i \mathbf{S}_i) + \theta \beta_i; \quad (24)$$

4) вычисляется "аналитический центр" матрицы \mathbf{S}_{i+1} и параметр β_{i+1} :

$$\mathbf{S}_{i+1} = \text{ac}\{\mathbf{I} < \mathbf{P}_i^{1/2} \mathbf{S} \mathbf{P}_i^{1/2} < \alpha_i \mathbf{I}, \mathbf{S} \in \Gamma\}, \\ \beta_{i+1} = (1 - \theta)\lambda_{\max}(\mathbf{P}_i \mathbf{S}_{i+1}) + \theta \alpha_i; \quad (25)$$

5) при выполнении условий $\mathbf{P}_i^{-1} \in \Gamma$ или $\mathbf{S}_{i+1}^{-1} \in \Phi$ алгоритм останавливается, иначе $i = i + 1$ и осуществляется переход к п. 3.

Используемый в выражениях (24)—(25) "аналитический центр" на примере матрицы \mathbf{P}_i вычисляется следующим образом:

$$\mathbf{P}_i = \arg \max\{\det L_i(\mathbf{P}) : L_i(\mathbf{P}) > 0, \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > \alpha \mathbf{I}, \\ [\mathbf{DPD}]_{ii} \leq \gamma_i, i = \overline{1, n_z}\},$$

где

$$L_i(\mathbf{P}) = \begin{bmatrix} \beta_i \mathbf{I} - \mathbf{S}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{S}_i^{1/2} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{S}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{S}_i^{1/2} - \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & F_1(\mathbf{P}) \end{bmatrix}.$$

Все вычисления в данном алгоритме осуществляются с использованием стандартных функций системы Matlab. Особенности реализации и свойства алгоритма описаны в работе [11].

Пример. Рассмотрим объект (1), представляющий собой последовательное соединение трех интеграторов, со следующими значениями матричных коэффициентов:

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_x = \mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} 1 & 9/5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{D}_x = \mathbf{I}_3. \quad (26)$$

Матрица интенсивности возмущений $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_2$.

Рассчитаем динамический регулятор для объекта с параметрами (26). Размерная матрица регулятора максимально возможного по построению порядка $n_v = 3$ в этом случае может принимать значение

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

откуда следует, что максимально возможный порядок стабилизирующего регулятора заданной точности равен двум ($\text{rank} \mathbf{E} = 2$).

Пусть необходимо синтезировать динамический регулятор первого порядка. Тогда блочные матрицы коэффициентов объединенной системы (4) принимают значения

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 9/5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Проверка условия достижимости (7) в общем виде приводит к ограничению $2p_{12} = 0$. С учетом этого зададим значения всех диагональных элементов ковариационной матрицы объединенной системы $\gamma = [3 \ 2 \ 1 \ 1]$.

Использование функции *feasp* пакета Matlab для решения задачи достижимости (22) на втором шаге алгоритма дает начальные значения матриц (при $\alpha = 10^{-4}$, $\theta = 0,2$, округленные до второго знака):

$$\widehat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \widehat{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} 2 & 2,05 & 0 & 0,23 \\ 2,05 & 6 & 0 & -0,43 \\ 0 & 0 & 22 & 0 \\ 0,23 & -0,43 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

В результате работы алгоритма были получены следующие взаимобратные матрицы:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 & 0,5 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & -6 & 2 \\ 3 & 6 & -11 & 4 \\ -6 & -11 & 22 & -8 \\ 2 & 4 & -8 & 4 \end{bmatrix},$$

которые удовлетворяют заданным ограничениям.

С использованием леммы 2 получено все множество матриц передачи соответствующих регуляторов по выходу

$$\{\mathbf{K}\}_k = \begin{bmatrix} 13,5 + k & -47,1 - 3,6k & 19,2 + 1,2k \\ 2,5 & -8,3 + 0,2k & 3,6 - 0,4k \\ 3,5 - 1,5k & -13,5 + 5,5k & 6 - 2k \end{bmatrix}, \quad (27)$$

где k — произвольное действительное число.

Множеству регуляторов (27) соответствует следующее множество матриц динамики замкнутой системы $\mathbf{A}_c = \mathbf{A} - \mathbf{BK}$:

$$\{\mathbf{A}_c\}_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -13,5 - k & -24,3 - 1,8k & 48,1 + 3,6k & -19,2 - 1,2k \\ -2,5 & -4,5 & 8,3 - 0,2k & -3,6 + 0,4k \\ -3,5 + 1,5k & -6,3 + 2,7k & 13,5 - 5,5k & -6 + 2k \end{bmatrix},$$

которое является устойчивым при любых значениях параметра k и которому соответствует заданное значение ковариационной матрицы состояния $\mathbf{P} > 0$.

Список литературы

1. Буков В. Н., Рябченко В. Н., Сельвесюк Н. И. Ковариационное управление: синтез стабилизирующих регуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 12. С. 11–20.
2. Сельвесюк Н. И. Синтез ковариационных регуляторов на основе технологии вложения систем // АИТ. 2005. № 6. С. 126–137.
3. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006.
4. Сельвесюк Н. И. Геометрический подход к решению задачи ковариационного управления // Мехатроника, автоматизация, управление, 2006. № 1. С. 1–14.
5. Бочаров А. С., Сельвесюк Н. И. Аналитическое решение задачи достижимости на основе канонизации матриц // Всеросс. науч.-техн. школа-семинар "Передача, обработка и отображение информации": материалы докладов. Ставрополь, апрель 2008 г. СВВАИУ, 2008. С. 93–95.
6. Сельвесюк Н. И. Рекурсивный алгоритм синтеза регуляторов заданной точности для стохастических МИМО-систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 1. С. 8–12.
7. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear matrix inequalities in system and control theory // SIAM, Studies in Applied Mathematics, Philadelphia, 1994.
8. Gahinet P., Nemirovski A., Laub A. J., Chilali M. The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide. Natick, MA: The Math Works, Inc., 1995.
9. Баландин Д. В., Коган М. М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007.
10. Boyd S., El Ghaoui L. Method of centers for minimizing generalized eigenvalues // Algebra and its Applications. 1993. Vol. 188. P. 63–111.
11. Iwasaki I., Skelton R. E. The XY-Centering Algorithm for the Dual LMI Problem: A New Approach to Fixed Order Control Design // International Journal of Control. 1995. Vol. 62. N 6. P. 1257–1272.
12. Сельвесюк Н. И. Синтез множества стабилизирующих динамических регуляторов заданной точности с использованием матрицы размерности // Матер. 4-й междунар. конф. по проблемам управления (МКПУ-IV). Москва, январь 2009 г. М.: ИПУ РАН, 2009.
13. Leibfritz F. Nonlinear Semidefinite Programs: Theory and Applications // University of Trier, 2005.

Г. Н. Рогачев, канд. техн. наук, доц.,
Самарский государственный
технический университет
rogachev@mail.ru

Использование гибридно-автоматного метода для описания систем автоматизации и управления*

Рассматривается метод описания систем автоматизации и управления, основанный на представлении таких систем в виде гибридных автоматов. Универсальность рассматриваемого подхода иллюстрируется примерами, среди которых регуляторы, реализующие типовые законы управления, а также нелинейные, оптимальные и программные регуляторы.

Ключевые слова: система управления, гибридный автомат, регулятор, алгоритм.

Введение

Последние десятилетия характеризуются лавинообразным ростом сфер применения цифровых процессоров в качестве основных элементов разнообразных технических устройств. Стремительно растущие (ввиду прогресса в области коммуникаций) возможности взаимодействия таких устройств не только с окружающим миром, но и между собой позволяют говорить об изменении среды обитания человека. Этот процесс аналогичен уже состоявшемуся кардинальному изменению информационной среды вследствие распространения и совершенствования компьютеров и их сетевой интеграции (включая Интернет).

Встроенные системы реального времени (embedded systems) — это единый комплекс взаимодействующих вычислительных, коммуникационных и физических процессов. В таких системах встроенные (в реальный физический мир) компьютеры непосредственно воздействуют на внешние физические процессы и, в свою очередь, действуют под их влиянием. Вычисления (работа программы) и физический процесс становятся единым целым; предсказать результат работы и понять любую из этих двух частей в отрыве от другой невозможно. Если части такой системы общаются друг с другом, в указанное единство добавляется третий компонент — процесс коммуникации (все чаще сетевой).

* Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы развития научного потенциала высшей школы в 2009—2010 гг. (проект № 2.1.2/4236) и РФФИ (грант 08-08-00383-а).

Данную область обозначают символом C^3 (Computation \times Control \times Communication). Группой международных экспертов область C^3 признана приоритетной, несущей потенциал революционного технологического прорыва и требующей адекватной реакции [1]. Основная особенность C^3 — размывание сложившихся границ. Аналогичная тенденция наблюдается в теории (стирание границ между такими науками, как математическая теория управления, теория динамических систем, информатика, теория информации и связи, ряд традиционных технических дисциплин и др.). Но она же проявляет себя в полной мере и в приложениях. Конструирование промышленных встроенных систем требует решения задачи исходя из ограниченного набора стандартизированных элементов, компенсации связанных с оборудованием проблем (ограниченные память и быстродействие процессора, неидеальность датчика или сервомотора и т. д.) за счет использования нетрадиционных алгоритмов управления и элементов программирования. Среди задач, стоящих в настоящее время перед теорией управления, одной из основных является задача управления системами, включающими как символьную (дискретную), так и непрерывную динамику, количественные и качественные переменные. Системы следующего поколения объединят логические операции, символьные рассуждения и принятие решений с операциями над непрерывными переменными. Такие системы относят к классу гибридных.

Гибридно-автоматный метод описания систем

В настоящее время для описания гибридных систем широко используется формализм "гибридный автомат" [2]. Гибридный автомат H — это совокупность $H = (Q, X, f, Init, Inv, E, G, R)$, где $Q = \{q_1, \dots, q_N\}$ — множество дискретных состояний; $X = R^n$ — множество непрерывных состояний; $f: Q \times X \rightarrow X$ — векторное поле; $Init \subseteq Q \times X$ — множество начальных состояний; $Inv: Q \rightarrow P(X)$ — инварианты; $E \subseteq Q \times Q$ — множество переходов; $G: E \rightarrow P(X)^*$ — условия перехода; $R: E \rightarrow P(X \times X)$ — отношение сброса. Пара $(q, x) \in Q \times X$ считается обобщенным состоянием гибридного автомата. Гибридные автоматы определяют все возможные пути, по которым их состояние может развиваться во времени t . Это возможное развитие имеет форму гибридных траекторий (t, q, x) . Пусть гибридный

* Под $P(X)$ понимается множество всех подмножеств множества X , $P(X) = 2^X$.

автомат стартует из начальной точки $(q_0, x_0) \in \text{Init}$. Какое-то время его непрерывное состояние x изменяется согласно дифференциальному уравнению $\dot{x} = f(q_0, x)$, $x(0) = x_0$, в то время как дискретное состояние q остается константой q_0 . Непрерывная стадия может продолжаться, пока $x(t) \in \text{Inv}(q_0)$. Если в некоторой точке гибридной траектории (t, q, x) будет выполнено условие перехода $G(q_0, q_1)$, будет иметь место дискретный переход $q_0 \rightarrow q_1$. В ходе дискретного перехода непрерывное состояние изменит свое значение с уровня x^- на уровень x^+ , $(x^-, x^+) \in R(q_0, q_1)$, т. е. осуществится действие перехода. После дискретного перехода непрерывная стадия возобновляется.

Гибридные автоматы удобно представлять в виде направленных графов. Вершины графа соответствуют дискретным состояниям, а грани задают возможные переходы между дискретными состояниями. С каждой вершиной сопоставляется набор непрерывных начальных состояний и дифференциальное уравнение, которому подчиняется непрерывная динамика системы. Каждой грани ставится в соответствие условие перехода и действие перехода.

В данной статье рассматривается метод описания систем автоматизации и управления, основанный на представлении цифровой системы автоматического управления (ЦСАУ) в виде гибридного автомата [3]. Этот подход позволяет, используя минимум изобразительных средств, описать реальные процессы, происходящие как в непрерывной, так и в дискретной части ЦСАУ. Для описания ЦСАУ может использоваться гибридный автомат в виде одного из представленных на рис. 1 вариантов направленного графа. Единственная вершина графа гибридного автомата отображает непрерывную динамику объекта управления в дискретных состоя-

ниях регулятора (между моментами его срабатывания), а грани задают возможные переходы между дискретными состояниями. С вершиной сопоставляется набор начальных состояний и дифференциальных уравнений, которым подчиняется непрерывная динамика. Каждой грани ставится в соответствие условие перехода и действие, осуществляемое регулятором в момент перехода.

Предлагаемый подход достаточно универсален. Действительно, при разных способах реализации системы управления переход может выполняться различными способами. В качестве инициирующего переход события может выступать сигнал от оператора или другой системы (супервизорного управления, релейной защиты). Условие перехода может включать время (что справедливо для систем с дискретным временем, к которым можно отнести все цифровые САУ), состояние (в случае систем с дискретными событиями, релейных и проч.) или их комбинацию. Вычисление управляющего воздействия можно осуществлять по различным алгоритмам, характерным для того или иного закона управления. Кроме того, передача управляющего воздействия может происходить с временными задержками, потерей части информации и наложением шумовой составляющей, что имеет место в реальных системах управления. Таким образом, гибридно-автоматная форма пригодна для описания различных классов систем управления. Резкая граница между системами с линейными регуляторами и системами с нелинейными регуляторами, системами с нечеткими регуляторами и системами с нейросетевыми регуляторами, дискретными по уровню и дискретными по времени системами, оптимальными системами и системами стабилизации, присущая традиционному подходу, отсутствует.

Рассматриваемый подход может быть назван также алгоритмическим методом описания систем автоматизации и управления. Эта форма описания если и не должна полностью заменить традиционную, модельную форму, то, по крайней мере, может сосуществовать с ней. "Модель и Алгоритм" являются наиболее фундаментальными понятиями не только в математике и использующих ее прикладных науках, но и во всей современной информационной технологии. Однако места, занимаемые этими понятиями, совершенно различны. В то время как Модель ... обычно используется лишь в качестве формального описания объекта вычислений, Алгоритм является базисом самой организации компьютерного процесса... Понятие Алгоритма — одно из наиболее фундаментальных как в вычислительной математике, так и в программной

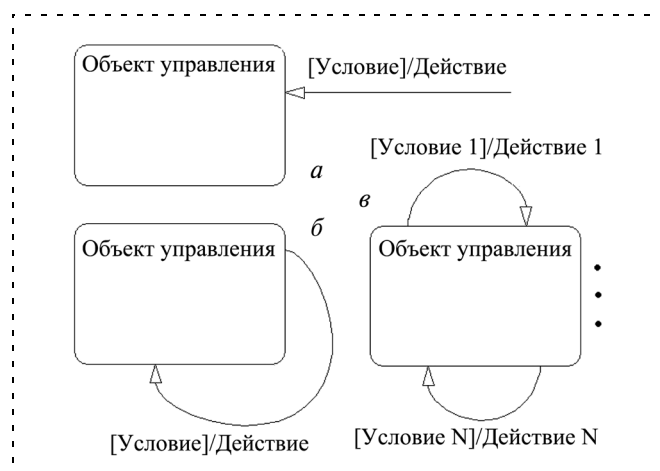


Рис. 1. Представление цифровой системы автоматического управления в виде гибридного автомата (а — разомкнутая; б — замкнутая одноконтурная; в — замкнутая многоконтурная система)

технологии в целом. Его абсолютно доминирующее положение определилось с самого начала эпохи ЭВМ: использовать компьютер означает задать Программу, т. е. Алгоритм. В подавляющем большинстве случаев указание машине, ЧТО за проблема решается, не имеет смысла, поскольку для ее работы необходимо определение того, КАК это выполнить" [4]. Понятно, что алгоритмическая форма выглядит более органичной для регуляторов ЦСАУ, нежели модельная, предполагающая описание регуляторов в виде дифференциальных или разностных уравнений либо передаточных функций.

Такая форма представления позволяет легко провести анализ влияния различных факторов на качество работы системы управления. Распространение такой формы описания будет способствовать открытости кода в области программного обеспечения промышленных регуляторов и программируемых логических контроллеров. Ну и наконец, эта форма представляется наиболее естественной в современных образовательных условиях всеобщей компьютерной грамотности. Удобным средством вычислительных экспериментов с ЦСАУ, представленным в гибридно-автоматной (алгоритмической) форме, является такое расширение математического пакета MATLAB, как Stateflow.

Использование гибридно-автоматного метода для описания типовых промышленных регуляторов

Проиллюстрируем универсальность рассматриваемого подхода примерами из различных предметных областей. Например, представленная в виде гибридного автомата ЦСАУ, реализующая для промышленных регуляторов один из типовых и наиболее распространенных законов регулирования (П, ПИ, ПИД-закон), будет иметь в простейшем случае условие перехода $[t > T_K]$, где t — текущее время, T_K — момент выдачи очередного управляющего сигнала. Действие перехода будет заключаться в вычислении управления по одной из формул [5]:

$$u(K) = a_P e(K); \quad (1)$$

$$u(K) = u(K-1) + a_{1PI} e(K) + a_{2PI} e(K-1); \quad (2)$$

$$u(K) = u(K-1) + a_{1PID} e(K) + a_{2PID} e(K-1) + a_{3PID} e(K-2) \quad (3)$$

для П-, ПИ- и ПИД-закона соответственно. В выражениях (1)–(3) $u(i)$ и $e(i)$ — соответственно, управление и ошибка в i -й момент времени; a_P , a_{1PI} , a_{2PI} , a_{1PID} , a_{2PID} и a_{3PID} — параметры регуляторов.

В любой реальной ЦСАУ управляющее воздействие ограничено по амплитуде. Следовательно, модель ЦСАУ необходимо дополнить нелинейным элементом типа "насыщение" и информацией о предельных значениях управляющего сигнала: $u(K) = \max(-1, \min(1, a_P e(K)))$.

Использование гибридно-автоматного метода для описания релейной системы

Рассмотрим далее нелинейную систему управления, релейный элемент которой имеет гистерезисную характеристику (рис. 2). В этом случае условие перехода имеет вид $((y \geq y_+) \text{ AND } (\dot{y} > 0)) \text{ OR } ((y \leq y_-) \text{ AND } (\dot{y} < 0))$. Действие перехода состоит в изменении управляющего сигнала с u_{\max} на u_{\min} или наоборот. Для описания действия можно использовать, например, функцию $iF(\arg_1, \arg_2, \arg_3) = \begin{cases} \arg_2, & \text{если } \arg_1 < 0; \\ \arg_3, & \text{если } \arg_1 \geq 0. \end{cases}$ Действие перехода будет иметь вид $iF(u - u_{\max}, u = u_{\max}, u = u_{\min})$.

Гибридно-автоматное описание оптимальной по быстродействию системы

Переход может инициироваться условием, включающим комбинацию нескольких сигналов. Этому случаю соответствует, например, оптимальный по быстродействию регулятор для объекта в виде двойного интегратора

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad \frac{dx_2}{dt} = u.$$

Для этой системы оптимального управления [6] условие перехода будет выглядеть следующим образом: $[(x_1 + x_2|x_2|/2) = 0]$. Действие перехода будет заключаться в вычислении управления $u = -\text{sign}(x_1 + x_2|x_2|/2)$.

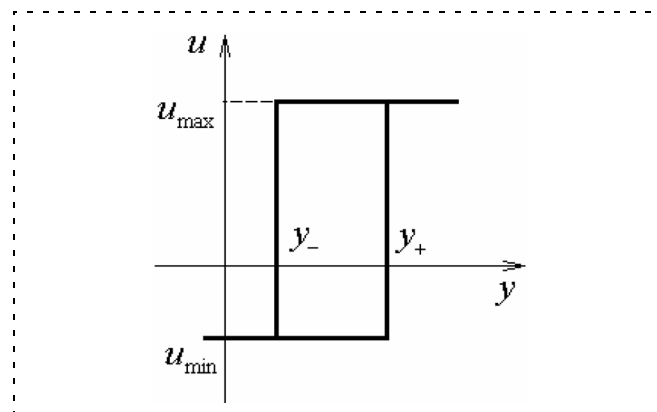


Рис. 2. Характеристика релейного элемента с гистерезисом

Гибридно-автоматное описание контроллера системы массового обслуживания

С использованием рассматриваемого подхода может быть описан контроллер, управляющий системой массового обслуживания. Схема системы изображена на рис. 3.

Поток заявок имеет заданную интенсивность. Поступившее задание помещается в накопитель $B1$, где ожидает обработку. Задания обрабатываются системой в две стадии. Чтобы задание прошло через систему, машина M должна последовательно осуществить стадию 1 и стадию 2 обработки задания. После стадии 1 задание помещается в накопитель $B2$, где ожидает стадию 2. По завершении стадии 2 обработка задания закончена, и задание покидает систему. Предполагается, что накопители $B1$ и $B2$ могут хранить каждый максимум два задания. Это означает, что если накопитель $B1$ уже содержит два задания, ожидающих стадию 1 обработки, система должна отказать любым заданиям до освобождения места в накопителе. Точно так же, если накопитель $B2$ уже содержит два задания, стадия 1 обработки не может быть выполнена до освобождения места в накопителе $B2$. Пусть на каждом временном шаге происходят следующие события:

- задание приходит в систему с вероятностью λ , принятое задание помещается в накопитель $B1$;
- машина M выполняет единственную стадию обработки одного задания, выбирая между накопителями $B1$ и $B2$.

Поскольку обслуживание заявок будет наиболее успешным при использовании для принятия решений всей полноты информации, реализуем управление машиной M посредством контроллера, включенного в обратную связь системы. Входами контроллера будут состояния накопителей. Пусть $X1$ — число заданий в накопителе $B1$, $X2$ — число заданий в накопителе $B2$. Условие перехода свяжем с моментом увеличения числа заданий в накопителе $B1$: $[X1(K) - X1(K-1) > 0]$. Будем считать, что машина M должна осуществить первую стадию обра-

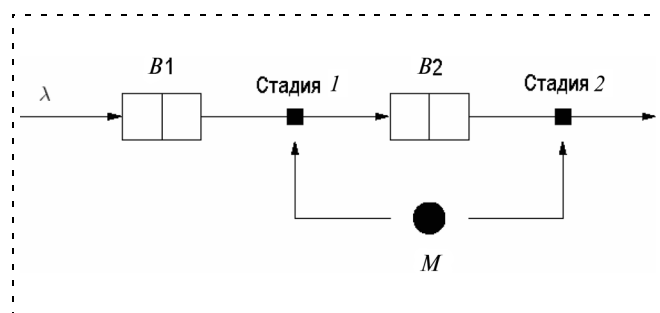


Рис. 3. Схема системы массового обслуживания

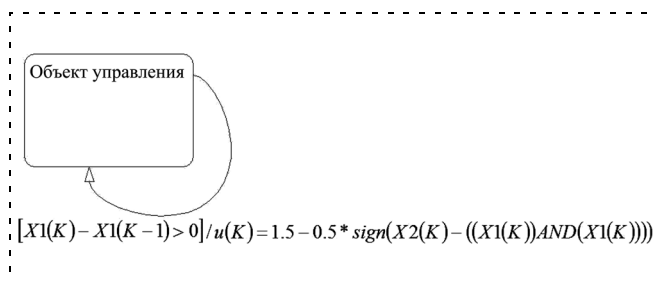


Рис. 4. Гибридно-автоматная форма контроллера системы массового обслуживания

ботки, если выходной сигнал контроллера равен 1 и вторую стадию обработки, если он равен 2. В [7] была найдена зависимость, формирующая закон управления системой массового обслуживания:

$$u(K) = 1,5 - 0,5 \text{sign}(X2(K) - ((X1(K)) \text{AND} (X1(K)))) \quad (4)$$

Анализ позволяет сделать вывод, что найденная дисциплина обслуживания эквивалентна правилу: всегда обрабатывать задания из накопителя $B1$, и только тогда обрабатывать задания из накопителя $B2$, когда накопитель $B2$ полон или накопитель $B1$ пуст. Гибридно-автоматная модель контроллера, управляющего системой массового обслуживания, представлена на рис. 4.

Численные эксперименты показали, что закон (4) дает тридцатипроцентное улучшение качества работы системы по сравнению с правилом строгой очереди обработки заданий, т. е. с регулятором, описываемым парой $[X1(K) - X1(K-1) > 0] / u(K) = 1,5 - 0,5 \text{sign}(-1)^K$ и более чем вдвое по сравнению со случайным выбором номера обрабатываемого задания для регулятора $[X1(K) - X1(K-1) > 0] / u(K) = 1 + \text{round}(\text{rand})$. Эксперименты проводили при значениях $0,6 < \lambda < 0,8$.

Использование гибридно-автоматного метода для описания системы управления индукционным нагревом

Иницирующим переход событием может служить наступление некоторого момента времени при условии, что определенный сигнал достиг некоторого уровня. Рассмотрим, например, систему управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек на базе трехканального КСП (компенсатора самопишущего потенциометрического) со встроенными релейными регуляторами [8]. Схематично эта система представлена на рис. 5.

Изделие помещается внутрь индукционного нагревателя, состоящего из индуктора, питающегося

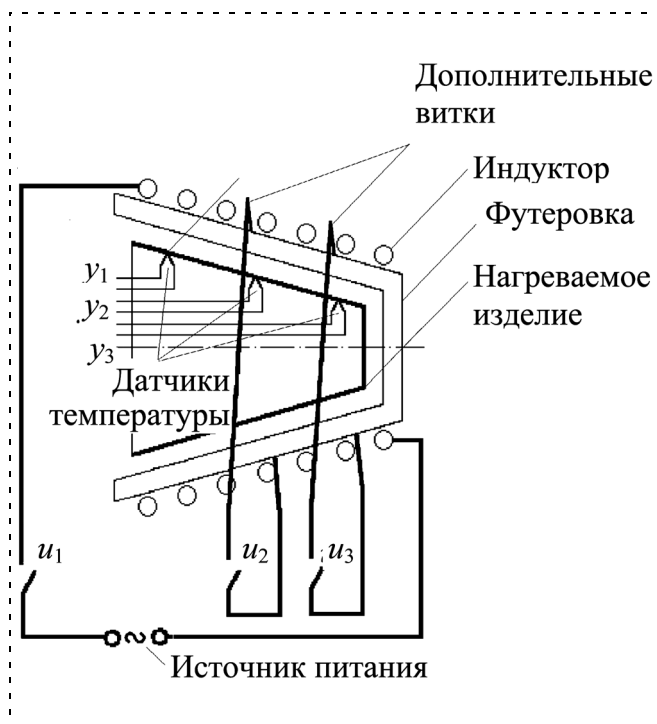


Рис. 5. Система управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек

от источника переменного тока, и теплоизоляции — футеровки. Температура нагрева контролируется термопарами в трех точках, разнесенных по длине нагреваемого тела (выходные сигналы y_1, y_2, y_3). Температурное поле на завершающей стадии процесса, когда собственно и происходит пайка, должно достаточно продолжительное время быть равномерным на уровне $y_1, y_2, y_3 \in [y_{\text{зад}} - \varepsilon, y_{\text{зад}} + \varepsilon]$, т. е. отклоняться от заданной температуры $y_{\text{зад}}$ не более чем на ε . Это требование обеспечивают три управляющих воздействия: u_1, u_2, u_3 . Основным каналом управления u_1 — регулируемая двухпозиционным релейным регулятором первого из каналов трехканального КСП мощность питающего индуктор источника. Этот канал позволяет воздействовать на среднюю температуру изделия, нагретого до температур, сравнимых с $y_{\text{зад}}$ (средняя температура при этом растет, если $u_1 = u_{\text{max}}$, и снижается, если $u_1 = u_{\text{min}}$), но не в состоянии существенно изменять закон распределения температуры по длине изделия. Для обеспечения требуемой равномерности нагрева индуктор снабжен дополнительными витками. В разомкнутом состоянии ($u_i = 0, i = 2, 3$) витки не оказывают влияния на процесс нагрева. При замыкании витка ($u_i = 1, i = 2, 3$) в нем наводится противоЭДС. Это вызывает локальное снижение мощности нагрева в зоне размещения витка и способствует выравниванию температуры в нагреваемом изделии.

С учетом разделения во времени работы трех каналов КСП удобнее использовать в гибридно-автоматном описании этой системы три отдельных перехода, каждый из которых потенциально возможен в соответствующие интервалы времени. Логическое условие выполнения первого перехода будет выглядеть следующим образом: $(t \in [0, T] + 3nT) \text{ AND } ((y_1 < y_{\text{зад}} - \varepsilon) \text{ OR } (y_1 > y_{\text{зад}} + \varepsilon))$, где T — длительность работы каждого канала, а $n = 0, 1, 2, \dots$ — дискретное время. Для второго и третьего переходов эти условия будут иметь соответственно вид $(t \in [T, 2T] + 3nT) \text{ AND } (y_2 > y_{\text{зад}} + \varepsilon)$ и $(t \in [2T, 3T] + 3nT) \text{ AND } (y_3 > y_{\text{зад}} + \varepsilon)$. Действия переходов можно описать с помощью функции iF : действие первого перехода $u_1 = iF(y_1 - (y_{\text{зад}} - \varepsilon), u_{\text{max}}, 1) iF(y_1 - (y_{\text{зад}} + \varepsilon), 1, u_{\text{min}})$, действие второго перехода $u_2 = iF(y_2 - (y_{\text{зад}} + \varepsilon), 0, 1)$, действие третьего перехода $u_3 = iF(y_3 - (y_{\text{зад}} + \varepsilon), 0, 1)$.

Гибридно-автоматное описание программной системы управления подвижным объектом

Рассмотрим, наконец, программный регулятор, оптимизирующий маневры подвижного объекта, описываемого системой нелинейных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \varphi; \\ \dot{y} &= v \sin \varphi; \\ \dot{\varphi} &= u, \end{aligned} \quad (5)$$

где переменные состояния — это две координаты x и y положения объекта на плоскости и угол φ направления вектора скорости; скорость $v = \text{const} > 0$. Скалярное управление u ограничено по модулю и определяет мгновенный радиус разворота вектора скорости. Примем для определенности $|u| \leq 1$. Систему (5) называют Dubins' Car (машина Дубинса) по фамилии ученого, изучавшего задачу наискорейшего ее перевода в заданную точку трехмерного фазового пространства. Им было доказано утверждение о числе и характере переключений оптимального управления [9]: кратчайший путь машины Дубинса для любых начальной и конечной точек является комбинацией не более чем трех примитивов — прямолинейного движения ($u = 0$), максимально резкого поворота налево ($u = 1$) или максимально резкого поворота направо ($u = -1$). Обозначим эти примитивы символами S (straight ahead, т. е. прямо вперед), L (left — налево) и R (right — направо). Тогда любой возможный вид кратчайшего пути определится как слово, являющееся последовательностью максимум трех символов. Возможных вариантов достаточно много, это, например,

слова LSL, RLR, SR, L. Для задания оптимального режима работы регулятора должны быть определены вид слова и продолжительность каждого из входящих в него примитивов.

Заметив, что любой примитив может встретиться в слове не более чем дважды, перейдем к гибридно-автоматной или алгоритмической форме описания программного регулятора для машины Дубинса (рис. 6). Теперь каждой паре векторов $(x_0, y_0, \varphi_0)^T$ и $(x_F, y_F, \varphi_F)^T$ начального и конечного положений подвижного объекта соответствует свой набор оптимальных параметров $T_{S1}, T_{S2}, T_{L1}, T_{L2}, T_{R1}, T_{R2}$ регулятора как моментов перехода от одного из примитивов к другому, т. е. задача определения оптимального режима работы регулятора параметризована.

Рассмотрим, например, задачу перевода машины Дубинса из точки $(0, 0, \pi/2)^T$ в точку $(0, 0, 0)^T$. Три варианта решения этой задачи, обеспечивающие локальный экстремум, соответствуют, как это явствует из рис. 7, словам LRL, SLS и RLR. В первом случае $T_{L1} = 0, T_{R1} = 1,9703, T_{L2} = 7,5345$, а время окончания движения $T_F = 9,5029$. Параметры

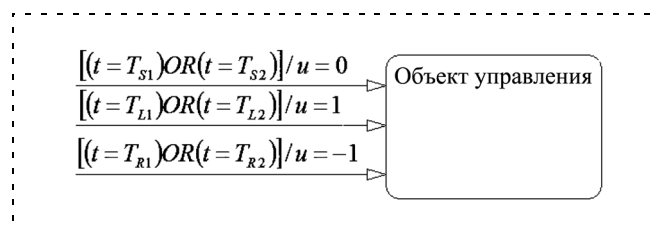


Рис. 6. Гибридно-автоматная форма программного регулятора для машины Дубинса

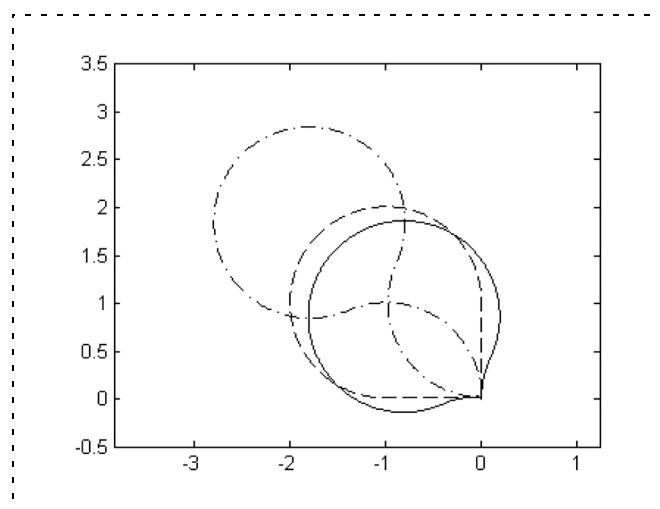


Рис. 7. Возможные траектории перевода машины Дубинса из точки $(0, 0, \pi/2)^T$ в точку $(0, 0, 0)^T$, сплошная линия — траектория RLR, штриховая — траектория SLS, штрихпунктирная — траектория LRL

$T_{R2} = T_{S1} = T_{S2} = -1$. Это означает при $t \geq 0$, что соответствующие условия не будут выполнены. Во втором случае $T_{S1} = 0, T_{L1} = 1,0000, T_{S2} = 5,7124, T_{R1} = T_{R2} = T_{L22} = -1$, а время окончания движения $T_F = 6,7124$. Наконец, в третьем случае $T_{R1} = 0, T_{L1} = 0,4363, T_{R1} = 5,8468$, а время окончания движения $T_F = 6,2831$. Параметры $T_{L2} = T_{S1} = T_{S2} = -1$.

Заключение

Приведенные примеры показывают, что гибридно-автоматный или алгоритмический метод описания систем автоматизации и управления весьма универсален, что позволяет использовать единую форму представления различных систем. Другим положительным качеством такого метода является его конкретность, приближенность к реальным вычислительным процессам в цифровом регуляторе. При необходимости можно получить оптимизированный по размеру, а соответственно, и скорости выполнения конечный исполняемый код в качестве операторов, описывающих условие и действие перехода, используя ассемблер и наборы инструкций соответствующего микропроцессора. В противном случае как условие перехода, так и действие перехода могут быть записаны на языках высокого уровня (например, Си), поскольку современный подход к программированию микропроцессорной техники предполагает использование компиляторов.

Список литературы

1. Murray R. Control in an information rich world: report of the panel on future directions in control, dynamics, and systems // URL: <http://www.cds.caltech.edu/~murray/cdspanel/>.
2. Henzinger T. A. The Theory of Hybrid Automata // Proc. of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 96, New Brunswick, New Jersey), 1996. P. 278—292.
3. Рогачев Г. Н. Гибридно-автоматный метод анализа и синтеза систем автоматического управления // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2006. № 41. С. 43—47.
4. Нариньяни А. С. Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. 1997. № 4. С. 11—16.
5. Гудвин Г. К., Гребне С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
6. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 391 с.
7. Рогачев Г. Н. Генетическое программирование в задачах поиска систематических решений // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2006. № 40. С. 37—42.
8. А. с. 1791965 СССР, МКИЗ Н05В6/06. Индукционная нагревательная установка периодического действия / Рогачев Г. Н. Оpubл. 30.01.93. Бюл. № 4.
9. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents // Amer. J. Math., 1957. Vol. 79. P. 497—516.

УДК 621.643.052:620.97

Г. Г. Гоппе, канд. техн. наук,
Иркутский государственный
технический университет
elprivod@istu.edu

Математические модели технологического комплекса электропривод— турбомеханизм— трубопроводная магистраль

**Часть 2. Математические модели
динамических процессов
при управлении
производительностью
методом дросселирования***

Для отдельных устройств и технологического комплекса в целом получены математические модели динамических процессов при управлении производительностью методом дросселирования. Структурная схема системы управления исследована на ПЭВМ при отработке задающих воздействий.

Ключевые слова: математическая модель, электропривод, турбомеханизм, трубопроводная магистраль, исполнительный механизм, дросселирование, структурная схема, регулятор.

С использованием технологических комплексов электропривод—турбомеханизм—трубопроводная магистраль во все возрастающих объемах транспортируется огромное количество жидких и газообразных продуктов.

Ранее в [1] были получены статические характеристики комплекса для двух способов управления его производительностью — дросселированием и изменением частоты вращения приводного двигателя.

Наряду со статическими режимами не меньший интерес вызывают и динамические процессы, которые происходят в устройствах комплекса при переходе от одного установившегося режима к другому.

В технологических режимах большинства производств объемная подача транспортируемой среды в единицу времени или сама является управляемой

* Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", № 10, 2009.

величиной, или с ее помощью регулируются другие переменные — температуры, уровни, концентрации, давление и др.

Во всяком случае, и в первом, и особенно во втором варианте производительность комплекса может изменяться в достаточно широком диапазоне. Поэтому показатели переходного процесса от одного значения производительности к другой должны соответствовать определенным требованиям по времени, точности отработки управляющих и возмущающих воздействий, значениям перерегулирования и другим показателям. Для потоков жидкостей особенно важным является отсутствие гидроударов и вибраций в магистрали и турбомеханизме. Достигается это соблюдением определенных законов изменения выходной величины во времени.

Отсюда следует, что для разработки эффективных систем управления рассматриваемым технологическим комплексом необходимо знать динамические математические модели. В них должна отражаться взаимосвязь выходных и промежуточных переменных величин с управляющими и возмущающими воздействиями, параметрами самого комплекса и транспортируемой среды во времени.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы на основании динамических моделей отдельных устройств комплекса получить математическую модель системы управления комплексом в целом и оценить качество управления им для метода дросселирования.

Динамические модели отдельных устройств комплекса

Способ управления производительностью определяет особенности уравнений динамики отдельных устройств и комплекса в целом. Особенно это сказывается на модели электропривода турбомеханизма.

Математическая модель асинхронного двигателя (АД)

В соответствии с условиями эксплуатации турбомеханизмов они запускаются в работу при закрытой задвижке на участке нагнетания. Электропривод разгоняется до установившейся скорости, определяемой частотой и напряжением питающей сети. На выходе турбомеханизма устанавливается

напор, соответствующий холостому ходу (производительности, равной нулю). После этого полностью открывается запорная задвижка на выходе турбомеханизма. Но производительность начинает нарастать только после открытия регулирующего органа (задвижки, клапана и др.). Обычно процесс первоначального запуска комплекса до необходимой производительности выполняется при разомкнутой системе управления. Оператор или машинист дистанционно управляет приводом исполнительного механизма до тех пор, пока выходная величина (производительность) не достигнет желаемого на данный момент значения. После этого привод подключается к регулятору.

В процессе установления необходимой производительности частота вращения электропривода (турбомеханизма) изменяется от холостого хода до номинальной, что на линейной части механической характеристики АД соответствует 1...2 % от установившейся частоты. В дальнейшем же уже при автоматическом управлении нагрузка электропривода при методе дросселирования даже при значительном снижении производительности уменьшается очень мало. Поэтому и отклонения от номинальной частоты вращения будут еще меньше и составят доли процента. По этой причине в переходных режимах частота вращения АД практически не изменяется, ее считают неизменной и равной номинальной (ω_H).

Математическая модель турбомеханизма

В технологическом комплексе турбомеханизм является средним звеном, взаимодействующим, с одной стороны, с электроприводом, а с другой — с трубопроводной магистралью. От электропривода он получает управляющее воздействие в виде частоты вращения, преобразует ее в значение напора и передает на вход магистрали.

Прослеживается и противоположное, или обратное, влияние. Производительность трубопровода, зависящая помимо давления на входе от его внутренних свойств, влияет по каналу внутренней обратной связи на напор турбомеханизма. В свою очередь, турбомеханизм, находясь на одном валу с электроприводом, увеличивает момент инерции его вращающихся частей за счет массы рабочего колеса и объема вращающейся жидкости в корпусе механизма. Поэтому математическая модель динамики турбомеханизма имеет такой же вид, как для статического режима, и для метода дросселирования представляется как

$$H = H_{0e} - kQ^2, \quad (1)$$

где H — напор на выходе турбомеханизма при $Q > 0$; H_{0e} — напор на выходе турбомеханизма на холостом ходе при $Q = 0$; Q — производительность турбомеханизма.

Для тех переходных процессов, в которых работает комплекс, при методе дросселирования величина H_{0e} принимается постоянной, поскольку постоянной является частота вращения электропривода и турбомеханизма. Поэтому динамика процессов в турбомеханизме определяется только характером изменения во времени производительности трубопровода.

Математическая модель потока транспортируемой среды

В динамической математической модели потока транспортируемой среды должна отражаться взаимосвязь между выходной величиной, свойствами самой среды, параметрами трубопровода и регулирующей аппаратуры, управляющих и других воздействий при изменении их во времени. Основным фактором, определяющим динамические показатели потока, являются его инерционные свойства. Они определяются тем, что при переходе от одного значения производительности к другой должна изменяться скорость той массы среды, которая находится в трубопроводе. Для этого необходимо потоку сообщить (или отвести) дополнительную энергию. А поскольку мощность используемых источников энергии ограничена, то процесс изменения производительности не может быть мгновенным и изменяется в течение некоторого времени.

Для получения уравнения динамики потока достаточно в уравнение Бернулли добавить инерционную составляющую. Для потока жидкости динамическая модель получена в виде [2]

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{HS_{yc}g}{L\gamma} - [1 + \lambda \frac{L}{D_{yc}} + \Sigma \xi_c + \xi_a(y)] \frac{Q^2}{2LS_{yc}}, \quad (2)$$

где S_{yc} — площадь внутреннего поперечного сечения трубопровода; L — длина напорной части трубопровода; λ — удельный коэффициент трения о стенки трубопровода; D_{yc} — внутренний диаметр трубопровода; γ — плотность перекачиваемой среды; g — ускорение свободного падения; $\Sigma \xi_c$ — суммарный коэффициент сопротивления, вносимый поворотами и местными сужениями трубопровода; $\xi_a(y)$ — коэффициент сопротивления трубопроводной арматуры (задвижек, клапанов, кранов); y — относительное положение затвора регулирующего органа трубопроводной арматуры ($y = 1$ — полностью открыт, $y = 0$ — полностью закрыт).

С точки зрения управления производительностью методом дросселирования наибольший интерес представляет величина $\xi_a(y)$. Данный коэффициент определяется положением затвора регулирующего органа: при полностью открытом затворе ($y = 1$) $\xi_a(y = 1) = \min$, при полностью закрытом ($y = 0$) — $\xi_a(y = 0) = \infty$; в промежуточных положениях ($0 \leq y \leq 1$) $\infty \leq \xi_a(y) \leq \min$. Отсюда следует, что изменяя относительное положение затвора, можно управлять производительностью.

В качестве регулирующего органа исполнительных устройств наибольшее применение имеют механизмы с линейной расходной характеристикой. Для воды она имеет следующий вид:

$$\xi_a(y) = \frac{20gS_{yc}^2}{(Q_{yc}y)^2}. \quad (3)$$

Из (2) видно, что для способа дросселирования переменной величиной, влияющей на производительность, является составляющая $\xi_a(y)$, а в (3) показан характер ее зависимости от относительного положения регулирующего органа. Однако при работе комплекса с таким способом управления в соответствии с (1) изменяется и напор турбомеханизма. Поэтому уравнения (1), (2) и (3) следует решить совместно. Но для (3) целесообразно более подробно рассмотреть метод формирования управляющего воздействия — y .

Математическая модель электропривода исполнительного механизма и регулирующего органа

Рассмотрим использование электропривода в качестве привода исполнительного устройства. Чаще всего это асинхронный электропривод, используемый в режиме работы с постоянной скоростью. При необходимости перестановки регулирующего органа электропривод подключается к сети, разгоняется до номинальной скорости и через редуктор обеспечивает перемещение затвора, изменяя величину y . При отключении электропривода от сети последний тормозится выбегом, что соответствует весьма малому перемещению затвора — доли процента от его полного хода.

При таких условиях работы математическая модель АД в динамике может быть представлена линейным дифференциальным уравнением первого порядка с правой частью вида

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = k_D U_\Phi, \quad (4)$$

где ω — частота вращения; U_Φ — номинальное напряжение в сети; k_D — постоянный коэффициент, определяемый числом пар полюсов АД и его номинальной скоростью; T_M — механическая постоянная времени всех вращающихся и перемещающихся масс механизма при вращении ротора АД.

Определить T_M расчетным путем затруднительно, но приближенно ее можно принять равной 1/3 времени разгона двигателя. Последнее обычно составляет 0,1...0,15 с, поэтому можно считать $T_M \approx 0,05$ с. Соотношение (4) удобнее представить в операционной форме в виде

$$\omega(s) = \frac{k_D}{T_M s + 1} U_\Phi(s), \quad (5)$$

где $\frac{k_D}{T_M s + 1}$ — передаточная функция; s — оператор Лапласа; $\omega(s)$ и $U_\Phi(s)$ — изображения Лапласа выходной и входной величин.

Редуктор целесообразно рассматривать в виде интегратора, входным сигналом которого является частота вращения АД, а выходным — угол поворота выходного вала редуктора, пропорционального относительному положению регулирующего органа. Тогда

$$y = k_p \int_{t_H}^{t_K} \omega(t) dt, \quad (6)$$

где k_p — коэффициент преобразования угла поворота вала редуктора в линейное перемещение; t_H , t_K — соответственно время начала и окончания вращения вала АД при очередном включении.

Уравнение (6) в операционной форме примет вид

$$y(s) = \frac{k_p}{s} \omega(s). \quad (7)$$

Коэффициент k_p определяется номинальной частотой вращения электропривода и временем полного перемещения затвора из одного крайнего положения в другое. Предположим, что номинальная частота вращения АД равна 1460 мин^{-1} , а время работы привода для полного перемещения от $y = 1$ до $y = 0$ составляет 40 с. Тогда полный угол поворота вала привода равен $\varphi = \frac{2\pi 1460}{60} 40 = 6115,6$ рад, а $k_p = \frac{1}{6115,6} = 1,635 \cdot 10^{-4}$.

Устройством, позволяющим измерять относительное положение затвора, является датчик положения. Если считать его безынерционным устройством с линейной шкалой и обозначить его выходной сигнал U_{oc} , то его уравнение записывается как

$$U_{oc} = k_{yoc}y. \quad (8)$$

При ручном режиме оператор, управляя приводом исполнительного устройства, отключает его, ориентируясь на показания датчика. При автоматическом управлении величины y или U_{oc} формируются регулятором положения. Самым простым для этих целей является релейный регулятор с зоной нечувствительности. Принцип его действия становится понятным из приведенной ниже структурной схемы.

Структурная схема системы управления комплексом с использованием способа дросселирования

Структурная схема системы управления является специальным видом математического описания, которая дает наглядное представление о характере преобразования соответствующих величин от входа до выхода системы. Структурная схема разработана для случая автоматического управления производительностью. Предполагается система подчиненного управления, где главный регулятор — это регулятор производительности, а подчиненный — регулятор относительного положения регулирующего органа.

В структурной схеме представлены данные для трубопровода длиной $L = 200$ м, внутренним диаметром $D_{yc} = 0,1$ м, $Q_{yc} = 885$ м³/ч = $0,2458$ м³/с, $\lambda = 0,02$. Данные турбомеханизма: $Q_H = 197$ м³/ч = $0,0547$ м³/с, $H_H = 1$ МПа, $H_{0e} = 1,5$ МПа, коэффициент k в (1) равен $166,8 \cdot 10^6$. Данные электропривода исполнительного механизма приведены выше.

Структурная схема системы управления показана на рис. 1.

В качестве регулятора производительности целесообразно использовать ПИ-структуру. Это гарантирует отсутствие ошибки регулирования в установленном режиме. Релейный регулятор положения с зоной нечувствительности упрощает управление электроприводом исполнительного механизма. Ширина зоны нечувствительности устанавливается исходя из значения выбега привода при отключении его от сети. В приведенном примере $\varepsilon = \pm 0,005$, что соответствует $\pm 0,5$ % от полного относительного перемещения регулирующего органа. Если сигнал на входе регулятора превышает $+\varepsilon$, то включается привод исполнительного механизма, и регулирующий орган перемещается для большего открытия. Как только сигнал уменьшается до значения, меньшего чем ε , привод отключается, и продолжается незначительный выбег. При необходимости снижения производительности электропривод включается на реверс, и значение y уменьшается.

Математическая модель системы управления в соответствии со структурной схемой на рис. 1 реализована в среде Matlab при отработке задающего воздействия в виде ступенчатых функций времени.

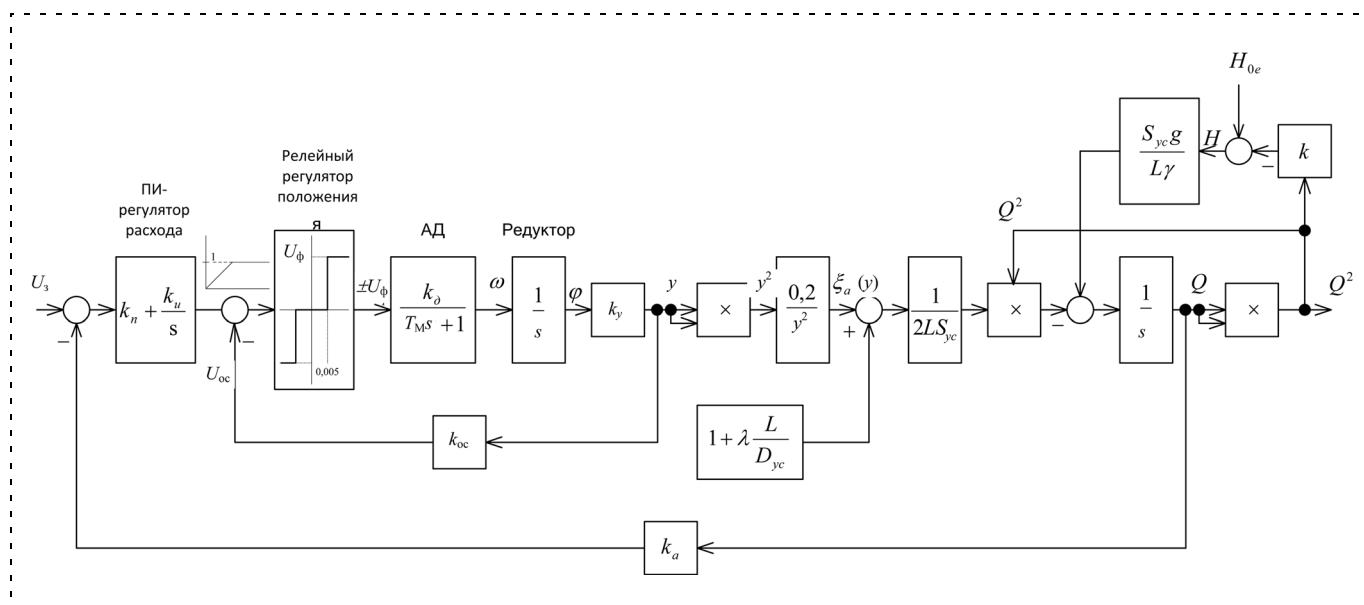


Рис. 1. Структурная схема системы управления производительностью комплекса способом дросселирования

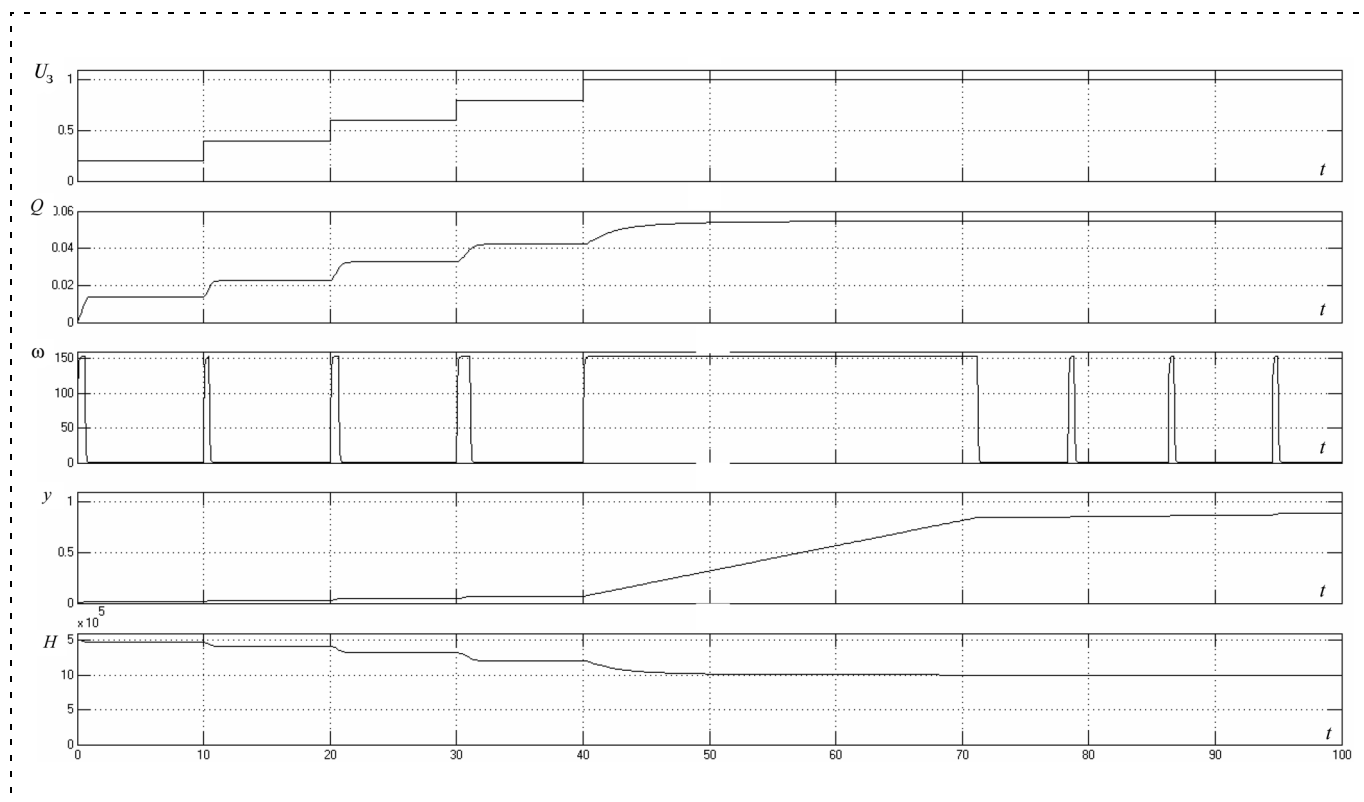


Рис. 2. Результаты исследования структурной схемы при отработке задающих воздействий

На рис. 2 показан характер изменения во времени некоторых переменных системы управления:

- задающего воздействия U_3 ;
- производительности комплекса Q ;
- частоты вращения электропривода исполнительного механизма ω ;
- перемещения затвора регулирующего органа y ;
- изменения давления на выходе турбомеханизма H .

Поведение ряда рассмотренных переменных можно было предсказать на основе их динамических моделей. В частности, при отработке задающих воздействий для малых значений производительности переходный процесс заканчивается достаточно быстро из-за высоких значений коэффициента усиления статической характеристики комплекса. Для относительной же производительности в диапазоне $0,8 \dots 1,0$ коэффициент усиления существенно ниже. Поэтому в автоматической системе отработка их требует значительного времени.

Чтобы ускорить этот процесс, целесообразна перенастройка параметров регуляторов. На рис. 2 показана перенастройка коэффициента интегральной части регулятора в диапазоне $0,8 \dots 1,0$. Если для

производительности $0 \dots 0,8$ она составляла $0,1$, то для названного выше диапазона — 1 . Время отработки при этом существенно уменьшилось.

В заключение можно отметить следующее: получены и исследованы динамические математические модели технологического комплекса электропривод—турбомеханизм—трубопроводная магистраль. Они показали свою работоспособность во всем диапазоне управления производительностью, но при этом проявилась особенность, характерная для статических характеристик, — значительное изменение коэффициента усиления. Последнее диктует целесообразность использования самонастройки параметров регуляторов.

Список литературы

1. Гоме Г. Г. Математические модели технологического комплекса электропривод—турбомеханизм—трубопроводная магистраль. Часть 1. Статистические режимы при двух способах управления производительностью // Мехатроника, автоматизация, управление. № 10. 2009.
2. Гоме Г. Г. Математическая модель расхода потоков жидкостей в трубопроводах как звено САР // Автоматизация химических производств. М.: НИИТЭХИМ. 1973. № 4. С. 32—43.

Е. В. Прохоренко, канд. техн. наук, доц.,
Б. Р. Норбоев, аспирант,
 Новосибирский государственный
 технический университет
 ev_pr@rambler.ru

Разработка и исследование математической модели электромеханической системы синхронного вакуумного выключателя

Сформированы требования к статическим и динамическим характеристикам электромеханической системы вакуумного выключателя с учетом физических и конструктивных параметров дугогасительной камеры. Определена функциональная схема построения синхронного вакуумного выключателя на основе оригинального конструктивного решения. Показаны результаты моделирования предложенной математической модели и экспериментальные данные реального объекта.

Ключевые слова: синхронный вакуумный выключатель, математическая модель электромеханической системы.

Вакуумные коммутационные аппараты достаточно широко используются в задачах энергетики для улучшения надежности высоковольтных силовых коммутаций, но при этом существует достаточно серьезная проблема — это коммутационные перенапряжения, генерируемые вакуумными выключателями. Эту проблему предлагается решать различными способами [1–3], одним из которых является создание управляемой "пофазной" коммутации различных типов нагрузки (трансформаторов, электродвигателей и т. д.) в нужные моменты времени с заданной динамикой главных контактов вакуумных дугогасительных камер, которая реализуется с помощью так называемых синхронных аппаратов. При этом коммутация с заданными динамическими характеристиками главных контактов позволяет существенно уменьшить перенапряжения в энергетической сети, а также увеличить срок службы вакуумного выключателя и коммутируемой нагрузки. Однако синхронного вакуумного выключателя на напряжение 35 кВ и ниже в настоящее время не создано, отсутствуют также функциональные схемы, адекватные математические модели электромеханической системы выключателя и сама система автоматического управления. Именно поэтому построение математической модели электромеханической системы синхронного вакуумного коммутационного аппарата, разработка его функциональной схемы является ключевым и актуальным вопросом при создании системы автоматического управления.

Особенности построения модели электромеханической системы синхронного вакуумного выключателя

Модель электромеханической системы (ЭМС) синхронного вакуумного выключателя предлагается строить с учетом физических особенностей процессов коммутаций силовых высоковольтных цепей в вакууме и синхронизации их с трехфазной энергосетью.

Под физическими свойствами коммутации в вакууме силовых высоковольтных цепей понимаются особенности, возникающие при перемещении подвижного контакта вакуумной камеры с точки зрения процессов гашения вакуумной дуги и конструкции контактной системы [4, 5]. Именно физические особенности работы вакуумной дугогасительной камеры определяют статические и динамические характеристики ЭМС [6]. В связи с этим задачей исследования является определение динамических и статических характеристик ЭМС вакуумного выключателя в целях реализации заданной динамики движения контактных групп вакуумного аппарата, приводящей к минимизации эффекта "дребезга" контакта вакуумной дугогасительной камеры при включении, обеспечению нужной скорости восстановления диэлектрического промежутка при отключении и обеспечению заданного контактного поджата. Кроме этого, понятие синхронного выключателя, как и понятие синхронной коммутации, подразумевает отключение либо включение каждой фазы (полюса) коммутационного аппарата в нужные моменты времени в зависимости от параметров токов и напряжений в трехфазной энергосети. Поэтому важно обеспечить заданные моменты коммутации, следовательно, и моменты срабатывания электромагнитных приводов вакуумного выключателя и выработать требования по быстрдействию ЭМС.

Формирование требований к динамическим и статическим характеристикам ЭМС

При изучении литературных источников (например, [1–3]) удалось выделить основные параметры, необходимые для корректной (правильной) работы контактной группы вакуумных дугогасительных камер (ВДК). К этим параметрам могут быть отнесены следующие:

1. Скорость замыкания и размыкания главных контактов v_c , v_o .
2. Перемещение подвижного контакта с учетом износа контактных пластин и паразитных перемещений механизмов S .

3. Характеристика дребезга контактов при включении t_d .

4. Номинальное усилие поджатия главных контактов F_c .

Вышеперечисленные желаемые параметры целесообразно отобразить на циклограмме (рис. 1). Здесь указаны следующие области, характеризующие основные требования к статическим и динамическим характеристикам ЭМС: область движения якоря в положение включено $0-S_5$, соответствующая времени включения t_0-t_1 , область дребезга контакта $t_d = t_1-t_2$, область состояния включено t_1-t_3 с дополнительным движением якоря электромагнита S_6-S_5 , область выключения электромагнита t_3-t_6 , для которой характерно паразитное движение якоря в области амплитуды S_5-S_6 . Значения скоростных параметров представленной ВДК в существующих вакуумных выключателях на напряжения 6...10 кВ, номинальный ток 1000 А составляют: $v_c = 0,9...1,2$ м/с; $v_o = 1,1...1,4$ м/с; статическое усилие поджатия $F_c = 1500...2000$ Н.

Из диаграммы является очевидной необходимость обеспечения заданных динамических характеристик включения и отключения электромагнита вакуумного выключателя с минимизацией дополнительных и паразитных движений подвижных частей и дребезга контакта с достаточным воздействием привода.

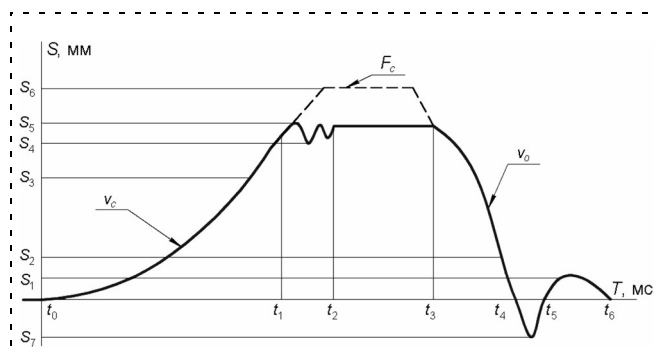


Рис. 1. Циклограмма работы контактной группы вакуумной камеры синхронного вакуумного выключателя

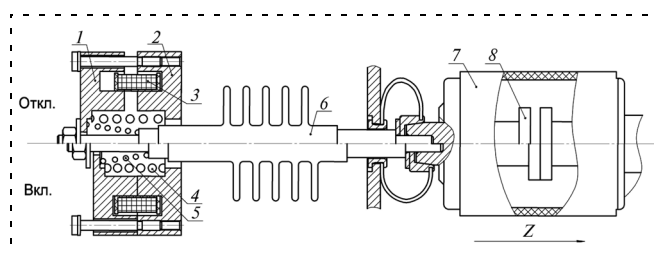


Рис. 2. Конструктивная схема ЭМС полюса синхронного вакуумного выключателя

Конструктивные особенности электрохимической системы синхронного вакуумного выключателя

Из используемых приводов вакуумных выключателей наиболее перспективным для решения поставленной задачи является электромагнитный привод прямого действия [7]. Оригинальная конструктивная схема ЭМС полюса, разработанная авторами, представлена на рис. 2.

Конструкция включает в себя электромагнитный привод прямого действия, якорь 1, ярмо электромагнита 2, выполненные из магнитомягкого материала, катушку 3, возвратную пружину 4, пружину поджатия 5, узел поджатия 6 контактной группы ВДК 7, и подвижный контакт 8 ВДК. Перемещение рабочего якоря 1, выполненного соосно со штоком, осуществляется только вдоль оси z. При этом заданная статическая характеристика, необходимая для оптимальной работы контактной группы ВДК 7, обусловлена узлом поджатия 6.

Работа привода осуществляется следующим образом. В начальный момент времени якорь 1 электромагнита находится в положении "отключено" и удерживается в этом положении возвратной пружиной 4. При подаче напряжения питания на катушку 3 происходит перемещение якоря 1 в положение "включено". Якорь в положении "включено" удерживается малым управляющим сигналом, подаваемым на обмотки катушки 3. Отключение электромагнита осуществляется следующим образом. При снятии напряжения питания с катушки 3 и подачи на нее перемагничивающего импульса напряжения обратной полярности, а также под воздействием пружины отключения происходит перемещение якоря в положение "отключено".

Одной из особенностей такой ЭМС является возможность пофазного управления вакуумным выключателем за счет использования одного привода на один полюс синхронного вакуумного выключателя (СВВ), что делает принципиально возможной реализацию синхронного вакуумного выключателя.

Построение математической модели ЭМС полюса синхронного вакуумного выключателя

Математическая модель (1), (2) ЭМС полюса СВВ с совмещенным электрохимическим приводом с узлом поджатия контактной группы ВДК с учетом физических особенностей ВДК представляется сле-

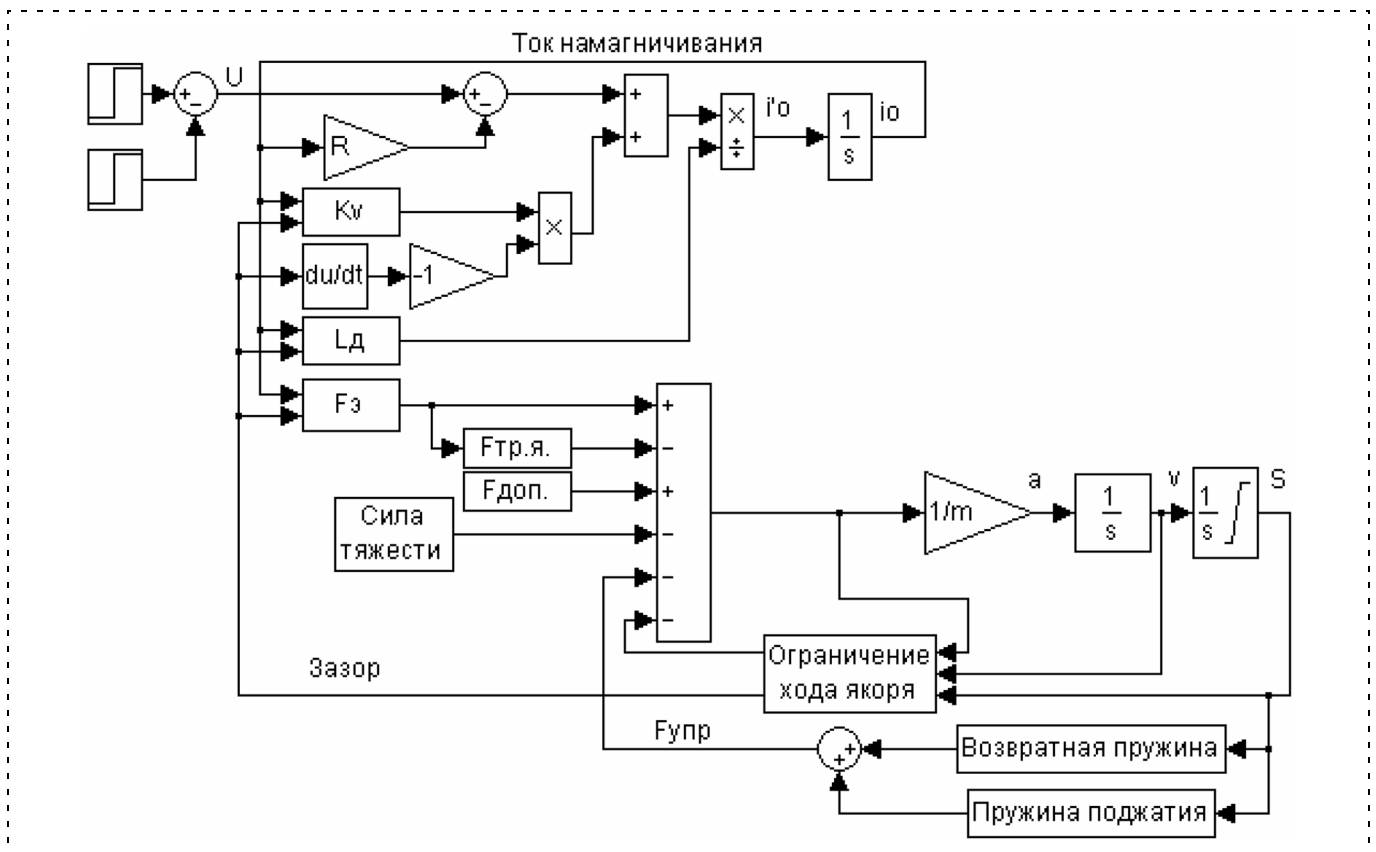


Рис. 3. Модель электромеханической системы полюса синхронного вакуумного выключателя в среде MatLab

дующей системой уравнений [8] (влияние вихревого тока в предложенной модели не учитывается):

$$\begin{cases} \dot{\Psi} = -Ri_o + U; \Psi = \Psi(i_o, \delta); \\ m\ddot{\delta} = f(\Psi, \delta, \dot{\delta}) + F_э(i_o, \delta); \\ L_d(i_o, \delta) = \partial\Psi(i_o, \delta)/\partial i; \\ K_v(i_o, \delta) = \partial\Psi(i_o, \delta)/\partial\delta. \end{cases} \quad (1)$$

После преобразования система уравнений принимает вид

$$\begin{cases} \frac{di_o}{dt} = \frac{1}{L_d} U - \frac{R}{L_d} i_o + \frac{K_v}{L_d} \frac{d\delta}{dt}; \\ F_э = m \frac{d^2\delta}{dt^2} - F_{в.к} + F_{тр} + F_{упр} + F_T + F_{доп}, \end{cases} \quad (2)$$

где U — напряжение; i_o — ток намагничивания обмотки, определяющий ее потокосцепление; R — сопротивление обмотки катушки; $F_э$ — электромагнитная сила; $F_{в.к}$ — сила вакуумной камеры; $F_{тр}$ — сила трения; $F_{упр}$ — заданное усилие, обусловленное силами возвратной пружины и пружины поджатия; F_T — сила тяжести; $F_{доп}$ — дополнительная сила воздействия на якорь; L_d — дифференциальная индуктивность; K_v — коэффициент скоростной

части ЭДС обмотки; m — масса подвижных частей; δ — зазор; v — скорость движения якоря.

Модель возможно реализовать в среде MatLab аналогично [9]. Модель (рис. 3) предусматривает использование статических зависимостей электромагнитной силы, дифференциальной индуктивности, коэффициента скоростной части ЭДС.

Экспериментальные исследования ЭМС

Для экспериментальных исследований ЭМС синхронного вакуумного выключателя создана оригинальная техническая реализация вакуумного выключателя с пофазными приводами, показанная на рис. 4, которая нашла применение в энергетических системах горно-рудных предприятий [7].

На рис. 5 представлена структурная схема экспериментального стенда, в состав которой входят следующие элементы: вакуумный выключатель ВВ (ЕХ-ВВ 10-20/1000 У3), состоящий из вакуумной дугогасительной камеры ВДК и электромагнитного привода ЭМ; датчик ускорения ДУ (В & К 4374), используемый для снятия зависимости ускорения движения якоря ЭМ от времени $a(t)$; цифровой осциллограф (Tektronix TPS2014); персональный компьютер ПК для обработки экспериментальных данных.

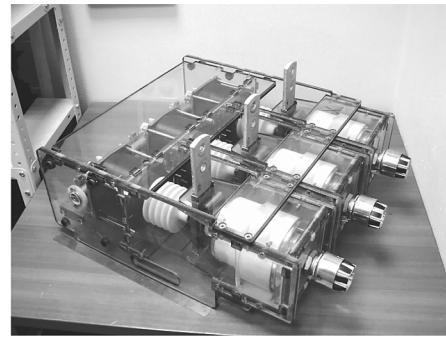
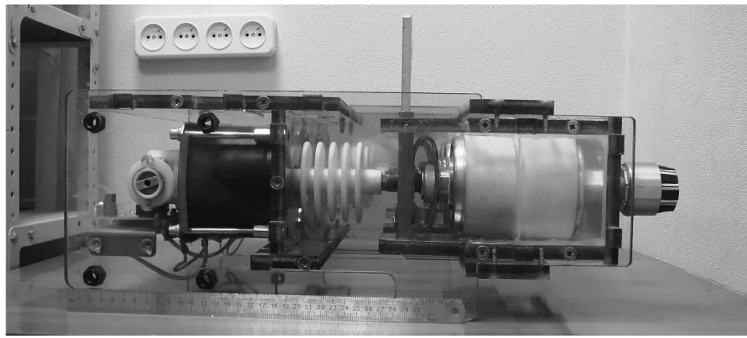


Рис. 4. Фотография экспериментального образца вакуумного выключателя EX-VV

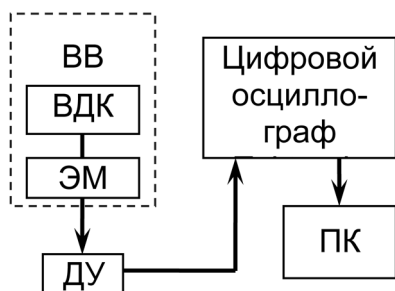


Рис. 5. Структурная схема экспериментального стенда

В результате экспериментальных исследований предложенной электромеханической конструкции и моделирования с использованием предложенной математической модели такие характеристики, как перемещение якоря электромагнитного привода от времени $S(t)$, скорость движения якоря от времени $v(t)$, полученные при включении и отключении СВВ, достаточно образом согласуются, при этом рассогласование амплитудного значения скорости составляет не более 10 % (рис. 6, 7). Это доказывает адекватность математической модели ЭМС.

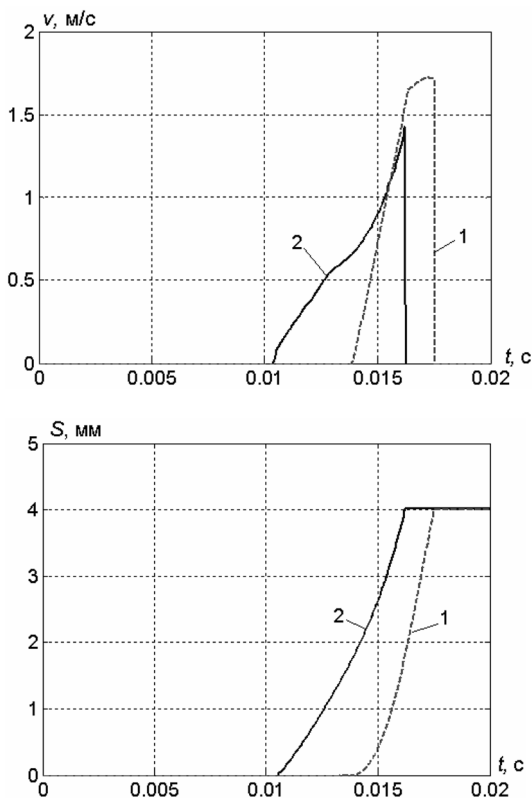


Рис. 6. Характеристики скорости движения $v(t)$ и перемещения якоря $S(t)$ электромагнита при включении: 1 — моделирование; 2 — эксперимент

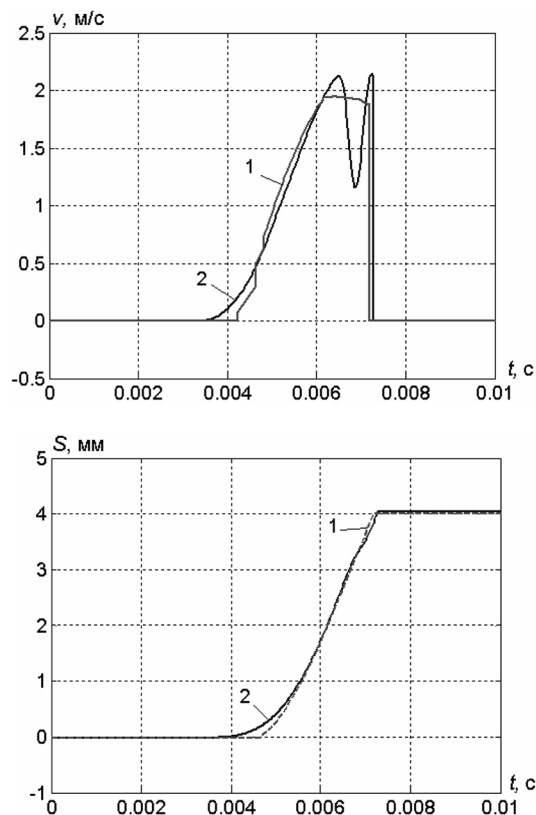


Рис. 7. Характеристики скорости движения $v(t)$ и перемещения якоря $S(t)$ электромагнита при отключении: 1 — моделирование; 2 — эксперимент

Характеристики перемещения при включении (рис. 6) имеют параболический характер, время трогания составляет при моделировании 10,55 мс, при эксперименте — 13,85 мс. Время срабатывания электромагнита при этом составляет 16,29 мс при эксперименте и 17,5 мс — при моделировании. При отключении время движения якоря ЭМ при моделировании и эксперименте составляет не более 4 мс. Эти значения, определяющие быстродействие привода, могут быть рекомендованы при создании реальных решений системы автоматического управления СВВ.

Функциональная схема синхронного вакуумного выключателя

Предлагаемая функциональная схема автоматической системы управления представлена на рис. 8. Контуры обратных связей сформированы датчиками тока ДТ и датчиками напряжения ДН, расположенными на каждой из фаз А, В и С трехфазной сети. Анализ данных токов и напряжений энергосети происходит в блоке внешних синхронизаций БВС, который осуществляет синхронизацию фазных модулей и управление электромеханической частью вакуумного выключателя ЭМС. Статику и динамику системы определяют параметры вакуумной дугогасительной камеры ВДК, подвижный контакт которой приводится в движение электромагнитным приводом прямого действия ЭМ. Обеспечение заданных динамических характеристик

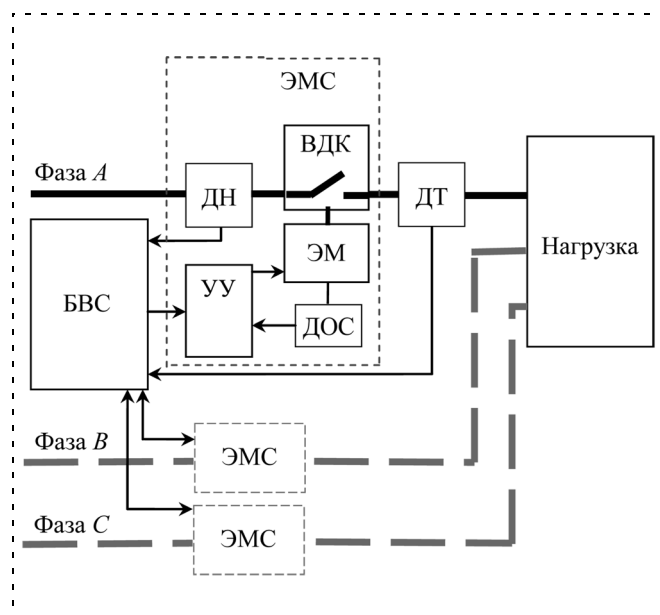


Рис. 8. Функциональная схема системы автоматического управления синхронным вакуумным выключателем

осуществляет устройство управления УУ, причем контур обратной связи формируется с помощью датчиков обратных связей ДОС (например — акселерометров), интегрированных в ЭМ.

Заключение

В результате работы сформированы требования к статическим и динамическим характеристикам ЭМС вакуумного выключателя с учетом физических и конструктивных параметров дугогасительной камеры. Определена функциональная схема построения СВВ на основе оригинального конструктивного решения.

Полученные в результате моделирования в среде MatLab и экспериментальных исследований оригинальной ЭМС зависимости показывают соответствие предложенной математической модели реальному объекту, причем динамические характеристики полученного опытного образца ЭМС соответствуют основным требованиям, предъявляемым к динамике подвижных контактов вакуумных дугогасительных камер. Это делает возможным реализацию СВВ, а также синтеза и моделирования регуляторов систем управления электромагнитным приводом синхронных вакуумных коммутационных аппаратов.

Список литературы

1. Кадомская К. П., Несговорев Е. С. Ограничение внутренних перенапряжений с помощью управления моментами коммутации выключателей // Электричество. 1969. № 9.
2. Борисов С. А., Качесов В. Е., Кукавский А. В., Шевченко С. С. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки // Электрические станции. 2006. № 11. С. 51—59.
3. Чалый А. М. Создавая новые стандарты электрооборудования // Новости электротехники. 2006. № 2.
4. Вакуумные дуги: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Лафферти. М.: Мир, 1982. 432 с.
5. Белкин Г. С. Применение самоуправляемых аппаратов (аппаратов, обладающих "интеллектом") для коммутации цепей высокого напряжения // Электротехника. 2005. № 12. С. 5—9.
6. Кадомская К. П., Копылов Р. В. Требования к вакуумной дугогасительной камере и специальным мерам для обеспечения надежного отключения заторможенных двигателей // Электрические станции. 2002. № 9. С. 56—60.
7. Пат. № 2344506 РФ. Вакуумный выключатель / Одокиенко С. И., Прохоренко Е. В. БИ. 2009. № 2.
8. Востриков А. С., Прохоренко Е. В., Норбоев Б. Р. Построение и исследование модели электромагнитного привода вакуумного выключателя // Электротехника. 2007. № 9. С. 28—31.
9. Кондратьев В. А., Соловьев А. Л., Егорова С. А. Расчет и моделирование средств и систем автоматики в вычислительной среде MATLAB: Учеб. пос. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. 61 с.

А. В. Мяготин, нач. отдела,
Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации
anton.myagotin@gmail.com

Тензорный метод как средство анализа процессов пенообразования в проекционных изображениях

Представлена методика цифрового анализа для расчета векторного поля скоростей процесса формирования металлических пен в последовательности радиографических изображений. Для решения задачи применяется тензорный метод, дополненный интерполяцией адаптивным окном Гаусса. Представлены результаты апробации методики на реальных радиографических последовательностях.

Ключевые слова: радиография, векторное поле скоростей, оптический поток, тензорный метод, металлическая пена.

Введение

Термин *пена* в физике твердого тела применяется к субстанции, содержащей высокую долю пузырьков газа, распределенных в жидком или твердом веществе. Среди пористых материалов, получаемых производственным путем, металлическая пена признана наиболее привлекательной для широкого спектра технологических и промышленных задач [1]. Данный материал обладает уникальной комбинацией физических и механических свойств, таких как высокая упругость, устойчивость к температурным колебаниям, высокое поглощение механических и звуковых воздействий, небольшой удельный вес, простота утилизации. В целом, изготовление материала, обладающего заданными физическими и механическими свойствами, требует корректной установки различных производственных параметров, например, давления, температурного режима, влажности. Решение подобной технологической задачи, в свою очередь, требует фундаментальных знаний о физических процессах и явлениях, сопутствующих *пенообразованию*, т. е. процессу образования пены.

Формирование металлической пены — сложный динамический процесс, включающий в себя такие механизмы, как возникновение и коллапс индивидуальных пор, дренаж, топологические преобразования [2]. Несмотря на интенсивность исследований последних лет в данной области, многие детали процесса пенообразования до сих пор остаются невыясненными. Современные исследования физики пенообразования базируются, преимущественно, на данных, полученных компьютерной томографией, применяемой к серии образцов, представляющих собой промежуточные этапы эволюции пены [3, 4]. Как следствие, динамику самого процесса форми-

рования пены, который по продолжительности занимает всего несколько минут, возможно восстановить лишь с невысокой точностью.

Недавние исследования с использованием рентгеновского излучения показали, что метод проекционной радиографии позволяет в реальном режиме времени визуализировать весь процесс пенообразования с момента генерации первичных пор до полного разложения материала [5, 6]. Тем не менее, получение количественных характеристик динамики пенообразования для радиографических видеопоследовательностей ограничивалось либо субъективными оценками наблюдателя, полученными "на глаз", либо вычислением простейших параметров, таких, например, как скорость роста верхнего фронта пены [7, 8]. Очевидно, что внедрение автоматических методов анализа радиографических изображений обеспечит исследователей полной и точной количественной информацией о динамике процесса пенообразования.

В данной статье представлен цифровой анализ векторного поля скоростей пенообразования в последовательностях радиографических изображений. В основу анализа положен тензорный метод [9], дополненный интерполяцией адаптивным окном Гаусса [17]. В статье приведены: классическая постановка задачи вычисления поля скоростей в серии изображений, известная в литературе как проблема вычисления *оптического потока*; краткий обзор методов, решающих данную проблему; основные детали тензорного метода. В заключение продемонстрированы экспериментальные результаты, полученные при анализе реальной радиографической видеопоследовательности.

Постановка задачи

В общем случае алгоритмы вычисления оптического потока принимают в качестве входа последовательность двумерных изображений и вычисляют поле скоростей $\mathbf{u}(x, y, t)$, в котором вектор скорости имеет горизонтальную u_x и вертикальную u_y компоненты. Последовательность изображений может быть представлена функцией $f(x, y, t)$, описывающей интенсивность цвета в некоторой точке (x, y) в заданный момент времени t [10]. Используя разложение Тейлора, функцию f можно представить в виде

$$f(x + dx, y + dy, t + dt) = f(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial t} dt + o(dx^2, dy^2, dt^2). \quad (1)$$

В уравнении (1) термами высокого порядка, как правило, пренебрегают. Принимая во внимание, что $f(x + dx, y + dy, t + dt) = f(x, y, t)$, т. е. локально изменение f можно представить как сдвиг в пространстве исходного изображения на величину (dx, dy)

за время dt , приведем так называемое *уравнение оптического потока*

$$-\frac{\partial}{\partial t}f = \frac{\partial}{\partial x}f \frac{dx}{dt} + \frac{\partial}{\partial y}f \frac{dy}{dt}, \quad (2)$$

или в компактной векторной форме: $-f_t = \nabla f_{2D} \mathbf{u}$, где $\nabla f_{2D} = (f_x, f_y)$ — пространственный градиент и $\mathbf{u} = (u_x, u_y)$ — неизвестный вектор скорости.

Обзор методов

В литературе приводятся различные способы решения уравнения (2) для нахождения векторного поля \mathbf{u} , которые условно можно разделить на *дифференциальные* и *методы блочного сравнения*.

В методах блочного сравнения плоскость изображения делится на множество неперекрывающихся прямоугольников фиксированного размера — *блоков* [11]. Для каждого блока текущего изображения определяется его смещение в последующем изображении видеопоследовательности путем максимизации *степени подобия*. В качестве данной меры, как правило, выступают среднеквадратичное отклонение, абсолютная разность или корреляционная функция. Неизвестный вектор скорости вычисляется как $\mathbf{u} = (dx/dt, dy/dt)$, где (dx, dy) — смещение блока и dt — период дискретизации. Методы блочного сравнения имеют невысокие вычислительные затраты, поэтому применяются, как правило, для быстрой обработки серии изображений, например, в алгоритмах сжатия видеопотока.

Дифференциальные методы более сложны в реализации, но при этом позволяют восстановить векторное поле скоростей с большей точностью. В типовом дифференциальном методе вводятся дополнительные ограничения применительно к модели оптического потока (2), которые позволяют найти уникальное решение для \mathbf{u} . Классическими примерами данных ограничений являются *сглаженность* векторного поля [10] и *условие постоянства* вектора скорости в области малого размера [12].

Более детальный обзор методов вычисления оптического потока приведен в [13].

Тензорный метод

В качестве базового алгоритма решения уравнения оптического потока был выбран *тензорный метод*, относящийся к дифференциальным методам [9]. Достоинствами данного метода являются высокая точность результата (угловая ошибка не превышает $0,5^\circ$), небольшие вычислительные затраты, наличие успешного опыта применения метода для анализа реальных видеопоследовательностей.

Рассмотрим ключевую идею тензорного метода. Для этого определим *вектор ориентации* $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_t)$, который в некоторой точке (x, y, t) -пространства указывает направление постоянного значения

функции f . При условии $r_t \neq 0$ можно показать [14],

что $\mathbf{u} = (u_x, u_y) = \left(\frac{r_x}{r_t}, \frac{r_y}{r_t} \right)$, т. е. задача нахождения

вектора скорости может быть сведена к задаче нахождения вектора \mathbf{r} . Принимая во внимание, что градиент $\nabla f = (f_x, f_y, f_t)$ всегда направлен в сторону максимального изменения функции f , выполняется $\mathbf{r} \perp \nabla f$. Соответственно, нахождение вектора \mathbf{r} можно сформулировать как проблему минимизации:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') (\mathbf{r} \cdot \nabla f^T(\mathbf{x}'))^2 dx' \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\mathbf{x} = (x, y, t)$ — точка трехмерного пространства; $W(\mathbf{x})$ — трехмерная оконная функция, определяющая веса усреднения частных производных в окрестности точки \mathbf{x} . Перепишем выражение (3) в матричной форме:

$$\mathbf{r}^T \left[\int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \nabla f^T(\mathbf{x}') \nabla f(\mathbf{x}') dx' \right] \mathbf{r} = \mathbf{r} \mathbf{J} \mathbf{r}^T \rightarrow \min,$$

где матрица $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xt} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yt} \\ J_{tx} & J_{ty} & J_{tt} \end{bmatrix}$ представляет собой

трехмерный структурный тензор, элементы которого рассчитываются по формуле

$$J_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') f_p(\mathbf{x}') f_q(\mathbf{x}') dx' \text{ для } p, q \in \{x, y, t\}.$$

Теорема 1. Пусть \mathbf{A} — симметричная матрица размерности $M \times M$; $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_M$ — собственные векторы и $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ — собственные значения (без потери общности полагаем $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$); \mathbf{r} — вектор единичной длины. Тогда выражение

$$S = \mathbf{r} \mathbf{A} \mathbf{r}^T \quad (4)$$

принимает минимальное значение, равное λ_M , если вектор \mathbf{r} коллинеарен вектору \mathbf{v}_M .

Доказательство. Используя теорему о разложении симметричной матрицы, выражение (4) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} S &= \mathbf{r} [\mathbf{v}_1^T \dots \mathbf{v}_M^T] \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_M \end{bmatrix} \mathbf{r}^T = \\ &= \sum_{i=1}^M \lambda_i (\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_i^T)^2 = \sum_{i=1}^M \lambda_i \cos^2 \alpha_i, \end{aligned}$$

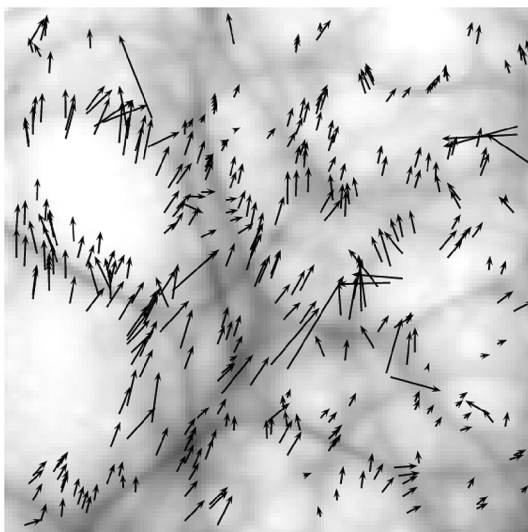
где α_i — угол между векторам \mathbf{v}_i и \mathbf{r} . Из ограничения

$$S \geq \lambda_M \sum_{i=1}^M \overbrace{\cos^2 \alpha_i}^{=1} = \lambda_M \text{ следует, что } S \text{ минимизиру-$$

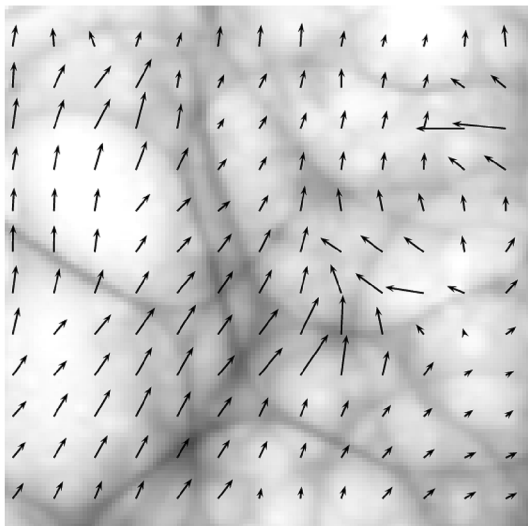
ется при $\alpha_M = k\pi$, где $k \in \mathbf{Z}$. Так как собственные векторы ортогональны, то для всех $i \neq M$ выполняется $\alpha_i = \pi/2$. ■

Более строгая форма доказательства данной теоремы приведена в [15].

Рассмотрим собственные векторы \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 и \mathbf{v}_3 структурного тензора \mathbf{J} (без потери общности считаем, что $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$). В соответствии с теоремой 1 искомый вектор ориентации \mathbf{r} совпадает с \mathbf{v}_3 , и задача



а



б

Рис. 1. Расчетное векторное поле скоростей в радиографической видеопоследовательности, полученное тензорным методом (а) и дальнейшей интерполяцией адаптивным окном Гаусса ($\sigma = 6,0$) (б)

нахождения оптического потока сводится к задаче определения собственных значений и векторов тензора \mathbf{J} . В качестве численного метода нахождения собственных значений в данной работе использовался алгоритм, представленный в [16].

Анализ ранга и собственных значений тензора \mathbf{J} позволяет выделить четыре конечных случая:

- $\text{rank} \mathbf{J} = 0$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$. Движение в заданной точке (x, y, t) отсутствует;
- $\text{rank} \mathbf{J} = 1$, $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$. Собственные векторы \mathbf{v}_2 и \mathbf{v}_3 определяют плоскость постоянных значений функции f в (x, y, t) -пространстве. Соответственно, однозначную ориентацию вектора \mathbf{r} восстановить невозможно. Тем не менее, нормаль вектора скорости \mathbf{u}^\perp , совпадающую по направлению с пространственным градиентом ∇f_{2D} , можно рассчитать как

$$\mathbf{u}^\perp = \mathbf{u}^\perp \mathbf{n} = -\frac{v_{1,t}}{v_{1,x}^2 + v_{1,y}^2} (v_{1,x}, v_{1,y});$$

- $\text{rank} \mathbf{J} = 2$, $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$, $\lambda_3 = 0$. Вектор \mathbf{r} определяет линию постоянных значений функции f . Искомый вектор скорости рассчитывается как

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} r_x & r_y \\ r_t & r_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{3,x} & v_{3,y} \\ v_{3,t} & v_{3,t} \end{pmatrix};$$

- $\text{rank} \mathbf{J} = 3$, $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$, $\lambda_3 \neq 0$. Область постоянных значений отсутствует. В реальных видеопоследовательностях данный случай может возникнуть при наложении изображений двух объектов, резком изменении яркости и контраста, наличии случайного шума.

Как следует из вышеприведенного разбиения случаев, однозначно возможно определить вектор скорости в точке (x, y, t) только при $\text{rank} \mathbf{J} = 0$ и $\text{rank} \mathbf{J} = 2$. Как следствие, в расчетном векторном поле следует ожидать наличие областей, значения скоростей в которых будут неизвестны. Данный эффект продемонстрирован на рис. 1, а.

Для восстановления полного векторного поля предлагается использовать методику интерполяции адаптивным окном Гаусса. Расчет интерполированного векторного поля описывается следующим выражением:

$$\langle \mathbf{u} \rangle(\mathbf{x}) = \sum_{\forall \mathbf{x}' \in U: \exists \mathbf{u}(\mathbf{x}')} \mathbf{u}(\mathbf{x}') G_\sigma(\mathbf{x}' - \mathbf{x}) / \sum_{\forall \mathbf{x}' \in U: \exists \mathbf{u}(\mathbf{x}')} G_\sigma(\mathbf{x}' - \mathbf{x}),$$

где G_σ — трехмерная функция Гаусса; $U \in \mathbf{R}^3$ — область интерполяции. Пример интерполированного поля $\langle \mathbf{u} \rangle$ приведен на рис. 1, б. Несмотря на очевидную простоту данной методики, сравнительные исследования показывают [17], что точность интерполяции адаптивным окном Гаусса сравнима с точностью более сложных методов.

Экспериментальные результаты

При экспериментальных исследованиях исходный материал для генерации металлической пены был получен посредством металлургического процесса [18]. Алюминиевый сплав, содержащий 7 % кремния, использовали в качестве базового материала. Гидрид титана (TiH_2) использовали как *газообразующий реагент* (т. е. вещество, выделяющее газ под воздействием высоких температур). В процессе подготовки оба вещества преобразовывали в порошкообразную массу и смешивали. Полученный материал прессовали при температуре $450^\circ C$ и давлении 120 МПа. В дальнейшем из него формировали экспериментальные образцы в форме брусков размера $17 \times 5 \times 6$ мм.

Основными элементами установки для генерации и мониторинга металлических пен являются источник рентгеновского излучения, печь и детектор. Во время нагрева и плавки образца фотоны, испущенные рентгеновским источником, проходят через материал, преобразуются сцинтиллятором экраном в видимый свет, который затем детектируется ПЗС-матрицей. Более детальная информация о данном эксперименте приведена в [19].

Для демонстрации представленной методики рассмотрим результаты вычисления векторного поля скоростей процесса пенообразования в стальной литейной форме (рис. 2). Подготовленный образец помещали в L-образную литейную форму. После подведения тепла наблюдался стремительный старт пенообразования. В данном эксперименте пена росла главным образом в вертикальном направлении до тех пор, пока нижняя полость на левой стороне не заполнилась материалом. Газообразующий реагент продолжал испускать водород, что привело к выдавливанию расплавленного металла из полости. На дальнейших кадрах видно, что потоки металла движутся вдоль полости вправо, а затем вверх. Расчетное векторное поле полностью совпадает с визуальными оценками наблюдаемого процесса и предоставляет количественную информацию о распределении скоростей в пене.

Другим примером применения представленной методики является анализ двустадийного пенообразования. В данном эксперименте литейную форму, ограничиваю-

щую рост пены, не использовали. Под действием высокой температуры изучаемый образец быстро приобретал пеннообразную структуру. После достижения некоторого объема пена стабилизировалась на короткое время и затем продолжала рост, но уже с меньшей скоростью. Сила тяжести в данном эксперименте направлена параллельно основному вектору роста, поэтому статистические свойства пены на некотором горизонтальном уровне предполагаются схожими.

В качестве количественной характеристики темпов роста пены в данном эксперименте использовали среднюю вертикальную скорость, рассчитываемую как

$$\langle u_y \rangle(y, t) = \frac{1}{M} \sum_{x=1}^m u_y(x, y, t),$$

где u_y — вертикальная компонента скорости; M — ширина изображения, измеренная в пикселях.

Двумерный график распределения средней вертикальной скорости представлен на рис. 3, а. Вертикальный срез на 80-й секунде (рис. 3, б) наглядно демонстрирует, что верхние слои пены двигаются с более высокой скоростью ($\sim 0,17$ мм/с) в сравнении с нижними слоями ($\sim 0,03$ мм/с). Данный эффект объясняется тем, что верхние слои выталкиваются вверх нижними слоями и при этом расширяются сами. На горизонтальном профиле распределения скоростей (рис. 3, в) две стадии роста пены отчетливо различимы как пики вертикальной скорости на 45-й и 90-й секундах.

Появление двустадийного роста пены хорошо согласуется с исследованиями по изучению про-

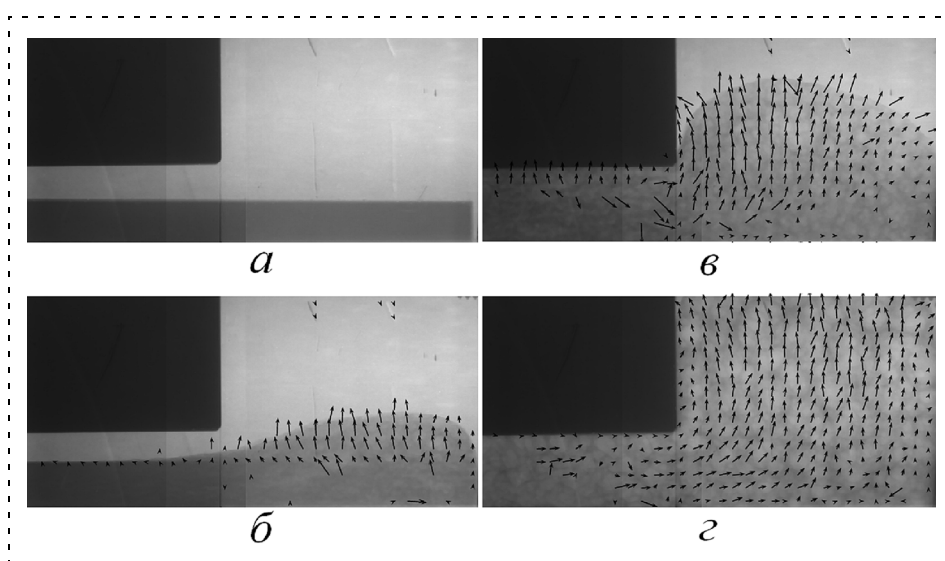


Рис. 2. Расчетное векторное поле скоростей процесса пенообразования в стальной литейной форме в моменты времени: а — 0 с; б — 25 с; в — 37 с; г — 60 с

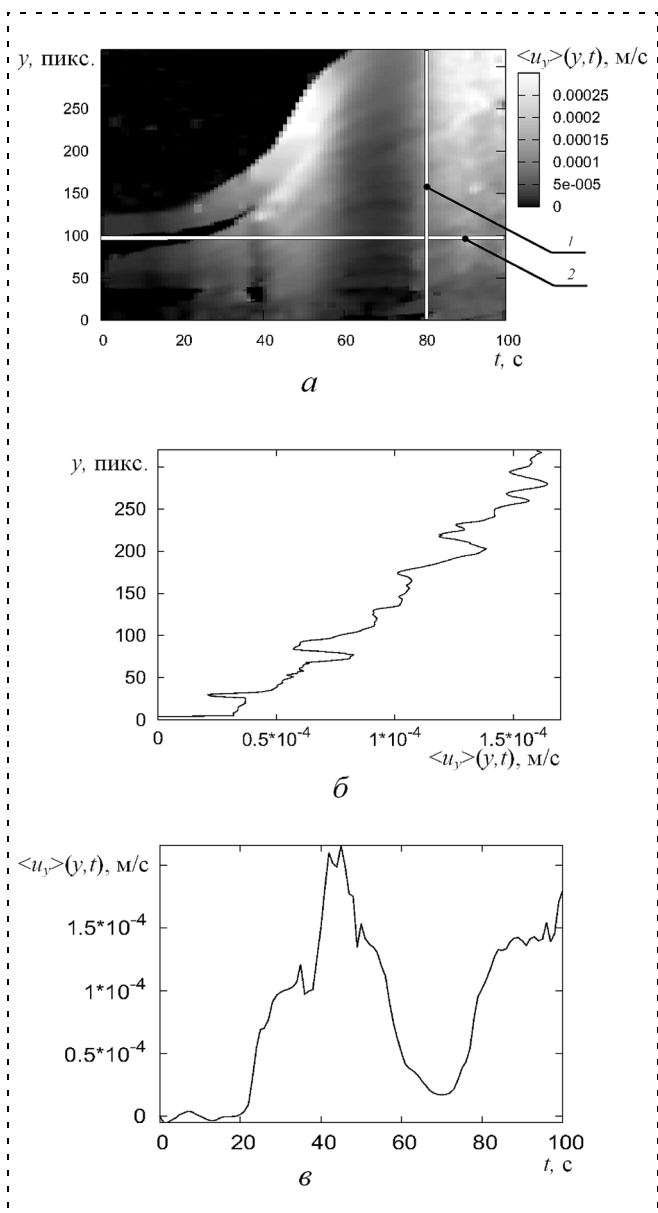


Рис. 3. Распределение скоростей процесса пенообразования: *a* — график $\langle u_y \rangle(y, t)$; вертикальный (*б*) и горизонтальный (*в*) профили; позиции 1, 2 на рис. 3, *a* соответствуют рис. 3, *б* и 3, *в*

цесса распада гидрида титана. Авторы [20] показали, что необработанный реагент имеет две активные фазы распада, как следствие, после достижения алюминиевым сплавом температуры плавления наблюдаются два пика роста металлической пены.

Заключение

Для расчета векторного поля скоростей в проекционных радиографических изображениях был реализован и апробирован тензорный метод, дополненный интерполяцией адаптивным окном Гаусса. Приведенный метод базируется на вычислениях собственных значений и векторов структурного

тензора. Метод применяли для анализа радиографических последовательностей процесса формирования металлической пены. Измеренные характеристики адекватно отражают сложную динамику процесса пенообразования и позволяют проводить ранее недоступный количественный анализ, ведущий к новым заключениям о наблюдаемых физических процессах.

Список литературы

1. **Banhart J.** Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams // *Progress in Materials Science*. **46**. 559 (2001).
2. **Weare D., Hutzler S.** *The Physics of Foams*, Clarendon Press, Oxford, 1999.
3. **Arnold M., Thies M., Koerner C., Singer R. F.** Experimental and numerical investigation of the formation of metal foam, Technical report, University of Erlangen, 2000.
4. **Lambert J., Cantat I., Dehnnay R., Renault A., Graner F., Glazier J. A., Veretennikov I., Cloetens P.** Extraction of relevant physical parameters from 3D images of foams obtained by X-ray tomography // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. **263**. 295 (2005).
5. **Banhart J., Stanzick H., Helfen L., Baumbach T.** Metal foam evolution studied by synchrotron radiography // *APL*. **78**. 1152 (2001).
6. **Moreno F. G., Frommi M., Banhart J.** Real-time X-ray radiography on metallic foams using a compact micro-focus source // *Advanced Engineering Materials*. **6** (6). 416 (2004).
7. **Wübben T., Stanzick H., Banhart J., Odenbach S.** Stability of metallic foams studied under microgravity // *J. Phys.: Condensed Matter*. **15**. 427 (2003).
8. **Helfen L.** Investigation of the Structure, Formation and Properties of Porous, Cellular and Low-Density Materials with Synchrotron Radiation Imaging. PhD thesis, Universitaet des Saarlandes, 2003.
9. **Naubecker H., Jähne B.** A tensor approach for precise computation of dense displacement vector fields // In *Mustererkennung 1997, 19 DAGM-Symposium*. Springer-Verlag, 1997. P. 199–208.
10. **Horn B., Schunck B.** Determining optical flow // *Artificial Intelligence*. **17**. 185 (1981).
11. **Jain J. R., Jain A. K.** Displacement measurement and its application in interframe image coding // *IEEE Transactions on Communication*. **29** (12). 1981. P. 1799–1808.
12. **Lucas B. D., Kanade T.** An iterative image registration technique with an application to stereo vision // In *Proceedings of Image Understanding Workshop*. 1981. P. 121–130.
13. **Beauchemin S., Barron J.** The computation of optical flow // *ACM Computing Surveys*. **27** (3). 433 (1995).
14. **Jähne B.** *Digital Image Processing*. Springer, 2002.
15. **Pao C. P.** *Линейные статистические методы и их применение*. М.: Наука, 1968.
16. **Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T.** *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 1992.
17. **Vedula P., Adrian R. J.** Optimal solenoidal interpolation of turbulent vectors: Application to PTV and super-resolution PIV // In *12th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lissabon, 2004.
18. **Gergely V., Clyne B.** The FORMGRIP process: Foaming of reinforced metals by gas release in precursors // *Advanced Engineering Materials*. **2** (4). 175 (2000).
19. **Myagotin A., Helfen L., Banhart J., Baumbach T.** In situ radiography of metal foaming processes: a quantitative analysis // In *3rd Workshop NDT in progress*, October 10–12. Prague. P. 223–233 (2005).
20. **Matijasevic B., Fiechter S., Zizak I., Wanderka N., Schubert-Bischoff P., Banhart J.** Decomposition behaviour of as-received and oxidized TiH₂ powder // In *PM 2004*. 17–21 October 2004. Vienna, 2004.

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

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

Г. В. Нагин, аспирант,

Санкт-Петербургский институт машиностроения

(ЛМЗ-ВТУЗ)

epishkin@mail.ru

Разработка и исследование системы стабилизации колебаний шестироторной вибрационной установки

Предложена концепция построения системы управления шестироторных вибрационных установок (ВУ). Разработано математическое описание электромеханической системы (ЭМС), определены рациональная структура и способы оптимизации динамики взаимосвязанной системы, обеспечивающие получение стабилизированных колебаний рабочего органа (платформы). Выполнено имитационное моделирование ЭМС ВУ в заданной области квазиустановившихся режимов, подтвердившее эффективность функционирования разработанной системы.

Ключевые слова: вибрационные установки, электромеханические системы, математические модели, способы построения и оптимизации, управляемые колебания.

Вибрационные установки (ВУ) с дебалансными роторами (ДР) широко применяются в различных отраслях промышленности и при испытаниях изделий на виброустойчивость. Исследованию динамики электромеханических систем (ЭМС) одно- и двухроторных ВУ посвящен ряд работ [1, 2, 3, 4], однако многороторные установки остаются мало изученными. Следует отметить, что увеличение числа ДР позволяет расширить возможный спектр колебательных режимов рабочего органа (платформы), а также развязать управление по отдельным координатам [5].

В данной статье обсуждается разработка системы автоматического управления (САУ) шестироторной ВУ, обеспечивающей стабилизированные колебания по максимальному числу степеней свободы, для чего необходимо:

- создание кинематической схемы и математического описания механической части ВУ;
- определение структуры и способов оптимизации динамики САУ ВУ;
- имитационное исследование САУ ВУ в заданной области квазиустановившихся режимов.

Кинематическая схема и математическое описание механической системы виброустановки

Для получения широкого спектра упругих колебаний платформы нами разработана кинематическая схема шестироторной ВУ, показанная на рис. 1,

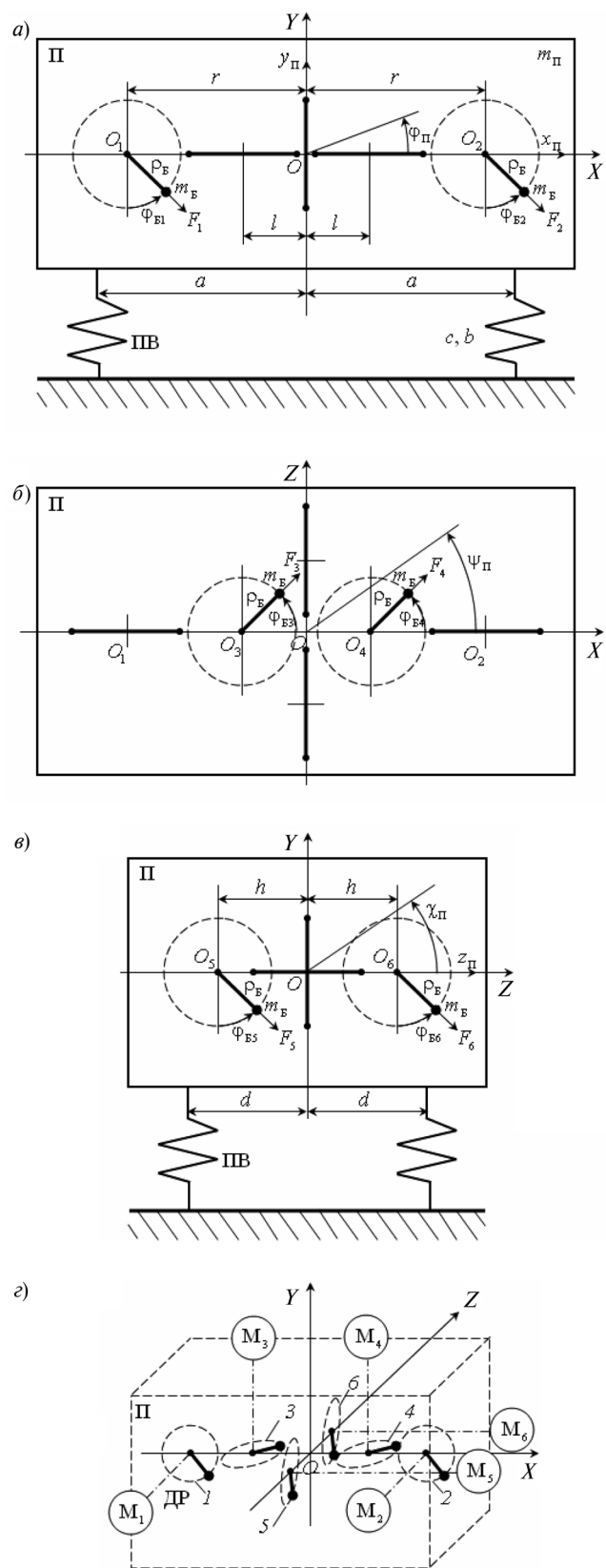


Рис. 1. Расчетные кинематические схемы виброустановки: а — вид спереди; б — вид сверху; в — вид сбоку; г — пространственное представление

где введены обозначения: $1, \dots, 6$ — ДР; m_6, m_{Π} — массы дебалансов и платформы; ρ_6, ϕ_{6i}, F_i — радиусы инерции, углы поворота и вынуждающие силы ДР; $\varphi_{\Pi}, \psi_{\Pi}, \chi_{\Pi}$ — углы поворота платформы относительно осей Z, Y, X ; c, b — эквивалентная жесткость и демпфирование пружинных виброизоляторов (ПВ). Пары ДР расположены симметрично относительно центра инерции ВУ, а их оси направлены так, чтобы получить гармонические колебания платформы по координатам $y_{\Pi}, z_{\Pi}, x_{\Pi}, \varphi_{\Pi}, \psi_{\Pi}, \chi_{\Pi}$. При этом пара 1—2 генерирует колебания в плоскости YX , пара 3—4 — в плоскости ZX , пара 5—6 — в плоскости YZ . Управляя скоростью и взаимным расположением ДР, можно получить определенный, достаточно широкий спектр пространственных колебаний виброплатформы с амплитудами $y_{\Pi \min} < y_{\Pi} < y_{\Pi \max}; z_{\Pi \min} < z_{\Pi} < z_{\Pi \max}; x_{\Pi \min} < x_{\Pi} < x_{\Pi \max}$, причем минимальные значения получаются при противофазном, а максимальные — при синфазном движении роторов по соответствующим координатам. Следует отметить, что $y_{\Pi \min}, z_{\Pi \min}, x_{\Pi \min}$ могут приближаться к нулю, а $y_{\Pi \max}, z_{\Pi \max}, x_{\Pi \max}$ достигать учетверенных значений по отношению к однороторным ВУ, у которых амплитуды колебаний определяются их резонансной характеристикой.

Для получения динамических моделей ВУ используют уравнения в независимых обобщенных координатах, известные как уравнения Лагранжа второго рода, на основании которых можно построить отдельные модели механической части установки по координатным осям Y, Z, X .

Модель механической части ВУ по оси Y

Уравнение поступательного движения платформы по оси Y имеет вид

$$m_0 \ddot{y}_{\Pi} + b_Y \dot{y}_{\Pi} + c_Y y_{\Pi} + m_0 g = F_{1Y} + F_{2Y} + F_{5Y} + F_{6Y}, \quad (1)$$

где F_{iY}, F_{jY} — проекции вынуждающих сил F_1, F_2, F_5, F_6 на ось Y ; $F_{iY} = m_6 \rho_6 [\ddot{\phi}_{6i} \sin \phi_{6i} - \dot{\phi}_{6i}^2 \cos \phi_{6i}]$, $i = 1, 2$; $F_{jY} = m_6 \rho_6 [\ddot{\phi}_{6j} \sin \phi_{6j} - \dot{\phi}_{6j}^2 \cos \phi_{6j}]$, $j = 5, 6$, причем первая составляющая учитывает тангенциальную силу, а вторая — центробежную силу; $m_0 = m_{\Pi} + 6m_6$ — общая масса платформы с дебалансами; $m_0 g$ — сила тяжести платформы; c_Y, b_Y — продольная (осевая) жесткость и демпфирование ПВ.

Уравнение углового движения платформы относительно оси Y имеет вид

$$J_{0Y} \ddot{\psi}_{\Pi} + b_Z a^2 \dot{\psi}_{\Pi} + c_Z a^2 \psi_{\Pi} = M_{3Y} + M_{4Y}, \quad (2)$$

где J_{0Y} — общий момент инерции платформы; $J_{0Y} = J_{\Pi Y} + 2m_6 r^2 + 2m_6 l^2 + 2m_6 h^2$; M_{3Y}, M_{4Y} —

проекции вынуждающих моментов относительно оси Y ;

$M_{iY} = m_6 \rho_6 l [\mp \ddot{\phi}_{6i} \sin(\phi_{6i} - \psi_{\Pi}) \pm \dot{\phi}_{6i}^2 \cos(\phi_{6i} - \psi_{\Pi})]$, причем верхний знак из "+" "-" действителен для $i = 3$, а нижний знак — для $i = 4$;

c_Z, b_Z — поперечная (тангенциальная) жесткость и демпфирование ПВ.

Модель механической части ВУ по оси Z

Уравнение поступательного перемещения платформы по оси Z имеет вид

$$m_0 \ddot{z}_{\Pi} + b_Z \dot{z}_{\Pi} + c_Z z_{\Pi} = F_{3Z} + F_{4Z} + F_{5Z} + F_{6Z}, \quad (3)$$

где $F_{iZ} = m_6 \rho_6 [\ddot{\phi}_{6i} \cos \phi_{6i} + \dot{\phi}_{6i}^2 \sin \phi_{6i}]$, $i = 3, 4$;

$$F_{jZ} = m_6 \rho_6 [\ddot{\phi}_{6j} \cos \phi_{6j} + \dot{\phi}_{6j}^2 \sin \phi_{6j}], \quad j = 5, 6.$$

Уравнение углового движения платформы относительно оси Z имеет вид

$$J_{0Z} \ddot{\phi}_{\Pi} + b_Y a^2 \dot{\phi}_{\Pi} + c_Y a^2 \phi_{\Pi} = M_{1Z} + M_{2Z}, \quad (4)$$

где $J_{0Z} = J_{\Pi Z} + 2m_6 r^2 + 2m_6 l^2$;

$M_{iZ} = m_6 \rho_6 r [\pm \ddot{\phi}_{6i} \sin(\phi_{6i} - \phi_{\Pi}) \mp \dot{\phi}_{6i}^2 \cos(\phi_{6i} - \phi_{\Pi})]$, верхний знак действителен для $i = 1$, нижний — для $i = 2$.

Модель механической части ВУ по оси X

Уравнение поступательного перемещения платформы по оси X имеет вид

$$m_0 \ddot{x}_{\Pi} + b_X \dot{x}_{\Pi} + c_X x_{\Pi} = F_{1X} + F_{2X} + F_{3X} + F_{4X}, \quad (5)$$

где $F_{iX} = m_6 \rho_6 [\ddot{\phi}_{6i} \cos \phi_{6i} + \dot{\phi}_{6i}^2 \sin \phi_{6i}]$, $i = 1, 2$;

$$F_{jX} = m_6 \rho_6 [-\ddot{\phi}_{6j} \sin \phi_{6j} + \dot{\phi}_{6j}^2 \cos \phi_{6j}], \quad j = 3, 4; c_X, b_X$$

— поперечная (тангенциальная) жесткость и демпфирование ПВ.

Уравнение углового движения платформы относительно оси X имеет вид

$$J_{0X} \ddot{\chi}_{\Pi} + b_Y d^2 \dot{\chi}_{\Pi} + c_Y d^2 \chi_{\Pi} = M_{5X} + M_{6X}, \quad (6)$$

где $J_{0X} = J_{\Pi X} + 2m_6 h^2$; $M_{iX} = m_6 \rho_6 h [\mp \ddot{\phi}_{6i} \sin(\phi_{6i} - \chi_{\Pi}) \pm \dot{\phi}_{6i}^2 \cos(\phi_{6i} - \chi_{\Pi})]$; верхний знак действителен для $i = 5$, нижний — для $i = 6$.

Уравнения динамики (1)—(6) отражают аналогию движений платформы по координатным осям.

Уравнения движения дебалансных роторов

$$J_i \ddot{\phi}_{6i} = M_{\text{д}i} - M_{\text{с}i} - M_{6i}, \quad (i = 1, \dots, 6), \quad (7)$$

где $J_i = J_{6i} + m_6 \rho_6^2$ — моменты инерции дебалансов, приведенные к валам двигателей; J_{6i} — централь-

ные моменты инерции дебалансов относительно собственных осей; $M_{дi}$ — моменты приводных электродвигателей; M_{ci} — моменты сопротивления ДР вследствие сухого и вязкого трения; $M_{бi}$ — гармонические моменты сопротивления дебалансов, причем

$$M_{б1} = m_{б\rho_6}[\ddot{y}_\Pi \sin \varphi_{б1} + \ddot{x}_\Pi \cos \varphi_{б1} + g \sin \varphi_{б1} - r(\ddot{\varphi}_\Pi \sin(\varphi_{б1} - \varphi_\Pi) - \dot{\varphi}_\Pi^2 \cos(\varphi_{б1} - \varphi_\Pi))];$$

$$M_{б2} = m_{б\rho_6}[\ddot{y}_\Pi \sin \varphi_{б2} + \ddot{x}_\Pi \cos \varphi_{б2} + g \sin \varphi_{б2} - r(-\ddot{\varphi}_\Pi \sin(\varphi_{б2} - \varphi_\Pi) - \dot{\varphi}_\Pi^2 \cos(\varphi_{б2} - \varphi_\Pi))];$$

$$M_{б3} = m_{б\rho_6}[\ddot{x}_\Pi \sin \varphi_{б3} + \ddot{z}_\Pi \cos \varphi_{б3} - l(\ddot{\psi}_\Pi \cos(\varphi_{б3} - \psi_\Pi) - \dot{\psi}_\Pi^2 \sin(\varphi_{б3} - \psi_\Pi))];$$

$$M_{б4} = m_{б\rho_6}[\ddot{x}_\Pi \sin \varphi_{б4} + \ddot{z}_\Pi \cos \varphi_{б4} - l(-\ddot{\psi}_\Pi \cos(\varphi_{б4} - \psi_\Pi) - \dot{\psi}_\Pi^2 \sin(\varphi_{б4} - \psi_\Pi))];$$

$$M_{б5} = m_{б\rho_6}[\ddot{y}_\Pi \sin \varphi_{б5} + \ddot{z}_\Pi \cos \varphi_{б5} + g \sin \varphi_{б5} - h(\ddot{\chi}_\Pi \sin(\varphi_{б5} - \chi_\Pi) - \dot{\chi}_\Pi^2 \cos(\varphi_{б5} - \chi_\Pi))];$$

$$M_{б6} = m_{б\rho_6}[\ddot{y}_\Pi \sin \varphi_{б6} + \ddot{z}_\Pi \cos \varphi_{б6} + g \sin \varphi_{б6} - h(-\ddot{\chi}_\Pi \sin(\varphi_{б6} - \chi_\Pi) - \dot{\chi}_\Pi^2 \cos(\varphi_{б6} - \chi_\Pi))].$$

На основании уравнений (1)–(7) можно построить динамическую структурную схему механической части шестироторной ВУ в координатных осях X, Y, Z с соответствующими движениями платформы $x_\Pi, \chi_\Pi, y_\Pi, \psi_\Pi, z_\Pi, \varphi_\Pi$, представленную в виде модулей в правой части рис. 2.

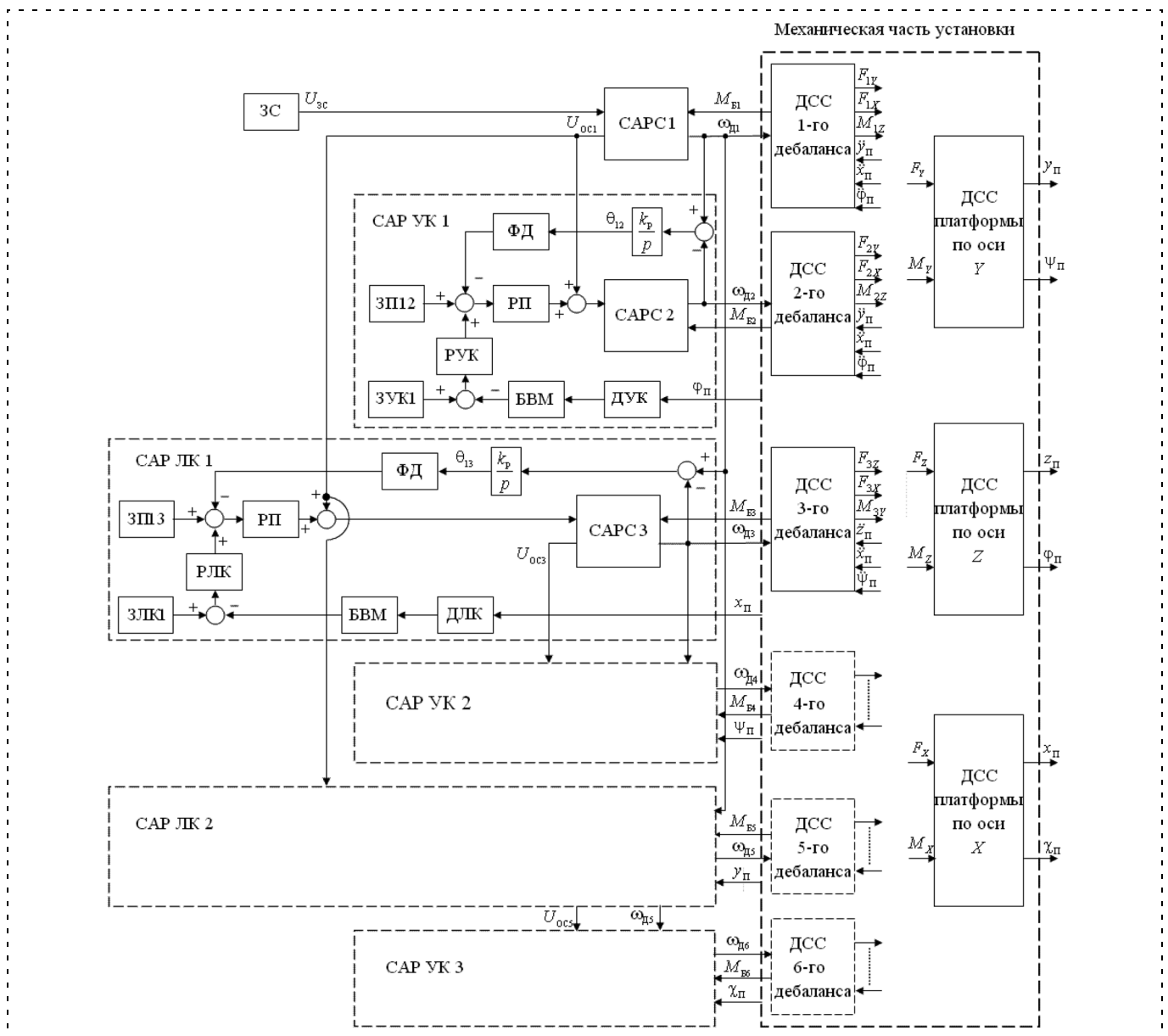


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации колебаний шестироторной вибрационной установки

Структура и способы оптимизации динамики САУ виброустановки

Шестироторная ВУ благодаря своим конструктивным особенностям, в частности, трем парам ДР с независимым приводом имеет определенный спектр колебательных режимов, получаемый при управлении как рассогласованием фаз дебалансов внутри пар $\theta_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$, $\theta_{34} = \varphi_3 - \varphi_4$, $\theta_{56} = \varphi_5 - \varphi_6$, так и рассогласованием фаз между парами дебалансов $\theta_{13} = \varphi_1 - \varphi_3$, $\theta_{15} = \varphi_1 - \varphi_5$.

Реализация данной концепции управления взаимосвязанной ЭМС ВУ представлена на рис. 2 и состоит в организации соподчиненных структур, причем первый привод выполняется ведущим с задатчиком скорости, а другие — ведомыми, регулируемые по угловому положению относительно ведущего привода с задатчиками положения роторов ЗП12, ЗП34, ЗП56 внутри пар и ЗП13, ЗП15 между парами ДР. На рис. 2 обозначены: РП, САРС — регуляторы положения и система автоматического регулирования (САР) скорости с подчиненными контурами тока приводных электродвигателей, в качестве которых могут быть применены двигатели постоянного тока или вентильные двигатели, питаемые от транзисторных преобразователей; ФД — фазовые дискриминаторы с коэффициентом усиления $k_{ФД}$; k_p — коэффициенты передачи редукторов; САР ЛК, САР УК — САР линейных и угловых колебаний платформы соответственно.

Рассмотрим способ стабилизации амплитуд колебаний платформы путем регулирования углов рассогласования ДР. Построение системы стабилизации осуществляется вводом контуров линейных колебаний, корректирующих углы рассогласования пар дебалансов θ_{13} и θ_{15} и контуров угловых колебаний, корректирующих углы рассогласования дебалансов θ_{12} , θ_{34} и θ_{56} . В контурах стабилизации линейных колебаний задатчики положения ЗП13 и ЗП15 осуществляют начальное задание углов рассогласования пар роторов, а задатчики ЗЛК1 и ЗЛК2 — задание амплитуд линейных колебаний. Контуров линейных колебаний, состоящие из датчиков линейных колебаний (ДЛК), блоков выделения модуля (БВМ) и регуляторов линейных колебаний (РЛК), осуществляют коррекцию сигналов задатчиков с учетом заданных значений ЗЛК и сигналов обратных связей по регулируемым координатам $x_{п}$, $y_{п}$. В контурах стабилизации угловых колебаний задатчики положения ЗП12, ЗП34 и ЗП56 осуществляют начальное задание углов рассогласования роторов, а задатчики ЗУК1, ЗУК2, ЗУК3 — задание амплитуд угловых колебаний. Контуров угловых колебаний, состоящие из датчиков угловых колебаний (ДУК), БВМ и регуляторов угловых колебаний (РУК), осуществляют коррек-

цию сигналов задатчиков с учетом заданных величин ЗУК и сигналов обратных связей $\varphi_{п}$, $\psi_{п}$, $\chi_{п}$.

Для надежного управления режимами работы ВУ необходимо подавление оборотных колебаний скоростей ДР, что требует достаточно высокого быстродействия САУ [6]. При этом контуры тока настраиваются на оптимум по модулю (ОМ) с частотами среза $\omega_c = 200...300 \text{ с}^{-1}$. Контуров скорости в условиях действия гармонических возмущений по моменту настраиваются на скорректированный оптимум с частотами среза $\omega_c = 100...150 \text{ с}^{-1}$. Контуров положения настраиваются на ОМ с частотами среза $\omega_c = 50...75 \text{ с}^{-1}$, причем для поддержания фазового рассогласования ДР необходимо, чтобы выполнялось условие $\omega_c > \omega_{уп}$ [3], где $\omega_{уп}$ — частота упругих колебаний платформы. Следует отметить, что указанные значения частот среза относятся к электроприводам с малоинерционными двигателями мощностью до 1 кВт, применяемым в испытательных вибростендах.

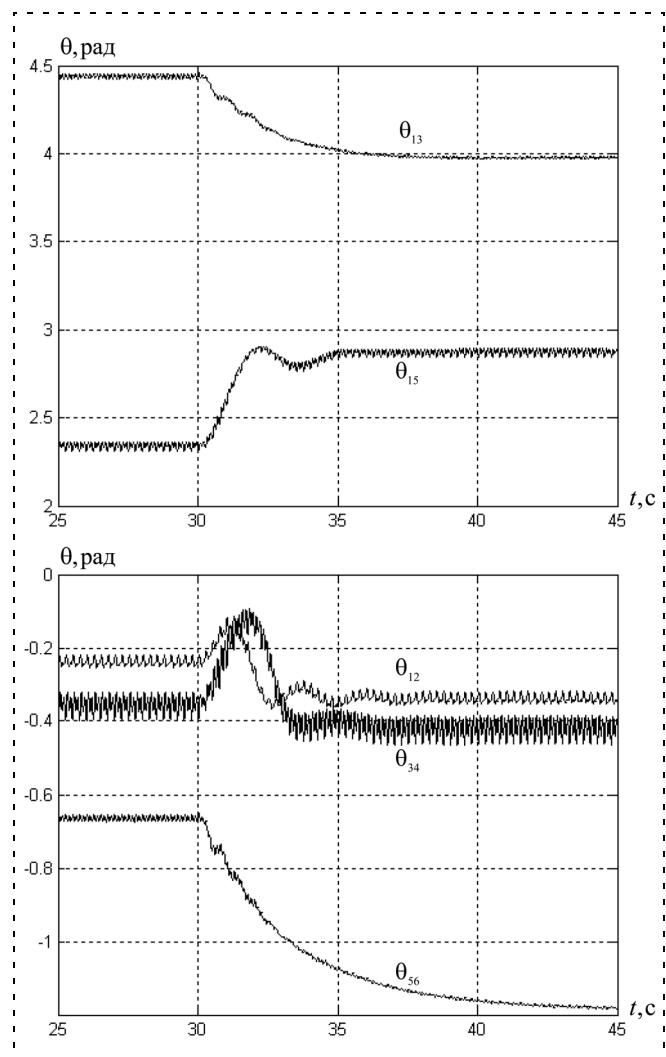


Рис. 3. Переходные процессы по углам рассогласования дебалансов при ступенчатой нагрузке платформы

Синтез РЛК выполняется на основании следующих соображений. Передаточная функция замкнутого контура положения (ЗКП) равна

$$W_{\text{ЗКП}}(p) = \frac{\varphi_i(p)}{U_{\text{ЗП}}(p)} \approx \frac{1}{k_{\text{ФД}}k_{\text{РС}}(2T_{\Sigma 0}^2 p^2 + 2T_{\Sigma 0}p + 1)}, \quad (8)$$

где $T_{\Sigma 0} = 2T_{\Sigma 1}$, $T_{\Sigma 1}$ — суммарные малые постоянные времени САРС; $i = 3, 5$ — номер дебаланса; $U_{\text{ЗП}}$ — напряжение задатчика положения.

Соответственно, передаточная функция разомкнутого контура линейных колебаний платформы (ЛКП) может быть записана в виде

$$W_{\text{ЛКП}}(p) \approx \frac{W_{\text{РЛК}}(p) \times}{k_{\text{ФД}}k_{\text{РС}}(2T_{\Sigma 0}^2 p^2 + 2T_{\Sigma 0}p + 1) \times} \rightarrow \frac{\times m_{\delta} \rho_{\delta} k_{\text{ДЛК}} \omega^2}{\times (T^2 p^2 + T_d p + 1)(T_{\text{ДЛК}} p + 1)}, \quad (9)$$

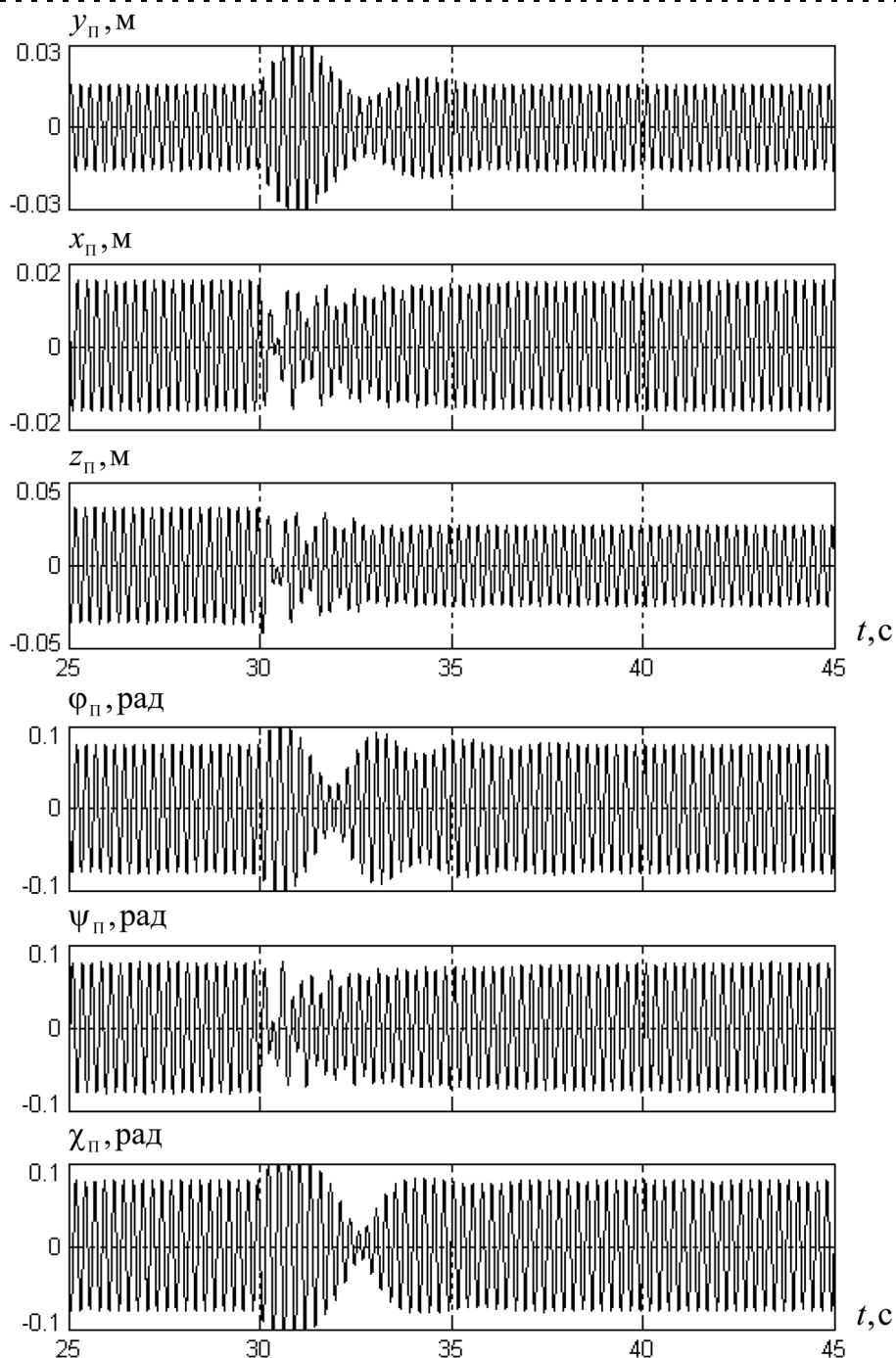


Рис. 4. Стабилизированные колебания виброплатформы при ступенчатой нагрузке

где $k_{\text{ДЛК}}$, $T_{\text{ДЛК}}$ — коэффициент передачи и постоянная времени ДЛК; $T = \sqrt{\frac{m_0}{c}}$ — собственная постоянная времени колебаний вибросистемы по направляемой координате (для $y_{\text{п}}$ учитывается продольная жесткость ПВ c_{y} , для $x_{\text{п}}$ — поперечная жесткость c_{x}); ω — угловая скорость ДР.

В качестве РЛК следует применить ПИ-регулятор с настройкой на ОМ

$$\beta_{\text{РЛК}} = \frac{k_1 k_{\text{ФД}} k_{\text{РС}}}{m_6 \rho_6 k_{\text{ДЛК}} \omega^2};$$

$$\tau_{\text{РЛК}} = T_{\Sigma \text{ЛК}}, \quad (10)$$

где $k_1 = 0,05 \dots 0,1$; $T_{\Sigma \text{ЛК}} = T_{\text{ДЛК}} + 2T_{\Sigma 0}$ — суммарная малая постоянная времени контура линейных колебаний. Частота среза контура $\omega_c \approx k_1 / T_{\Sigma \text{ЛК}}$.

Аналогичным образом выполним синтез РУК. Передаточная функция разомкнутого контура угловых колебаний (КУК) платформы по $\varphi_{\text{п}}$ может быть записана в виде

$$W_{\text{КУК}}(p) \approx \frac{W_{\text{РУК}}(p) \times}{k_{\text{ФД}} k_{\text{РС}} c_{\text{y}} a^2 (2T_{\Sigma 0}^2 p^2 + 2T_{\Sigma 0} p + 1) \times} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times m_6 \rho_6 r k_{\text{ДУК}} \omega^2}{\times (T^2 p^2 + T_d p + 1)(T_{\text{ДУК}} p + 1)}, \quad (11)$$

где $k_{\text{ДУК}}$, $T_{\text{ДУК}}$ — коэффициент передачи и постоянная времени ДУК.

В качестве РУК следует применить ПИ-регулятор с настройкой на ОМ:

$$\beta_{\text{РУК}} = \frac{k_2 k_{\text{ФД}} k_{\text{РС}} a^2}{m_6 \rho_6 r k_{\text{ДУК}} \omega^2};$$

$$\tau_{\text{РУК}} = T_{\Sigma \text{УК}}, \quad (12)$$

где $k_2 = 0,05 \dots 0,1$; $T_{\Sigma \text{УК}} = T_{\text{ДУК}} + 2T_{\Sigma 0}$ — суммарная малая постоянная времени контура угловых колебаний. Частота среза контура будет равна $\omega_c \approx k_2 / T_{\Sigma \text{УК}}$.

Для координат $\psi_{\text{п}}$ и $\chi_{\text{п}}$ в формулах (11), (12) вместо параметров r , a будут l , a и h , d , а также соответствующая жесткость ПВ.

Имитационное исследование САУ колебаниями виброустановки

Имитационное моделирование САУ колебаниями ВУ выполнено на ЭВМ в пакете программ MATLAB — Simulink. Структура модели скомпонована по динамической структуре рис. 2 на основе полученных выше математических модулей механической и электрической частей ЭМС. Имитационное моделирование ЭМС проведено в дорезонансной зоне на скорости приводов $\omega_{\text{д}i} = 0,8\omega_{\text{уп}}$ для оценочных параметров ВУ ($\omega_{\text{уп}} \approx 30 \text{ с}^{-1}$). Оценка эффективности предложенного способа стабилизации колебаний выполнена при подаче возмущающего воздействия в виде ступенчатого нагружения виброплатформы массой 5 кг на 30-й секунде моделирования.

Без системы стабилизации нагрузка оказывает существенное влияние на амплитуды колебаний по линейным $y_{\text{п}}$, $x_{\text{п}}$, $z_{\text{п}}$ и угловым $\varphi_{\text{п}}$, $\psi_{\text{п}}$, $\chi_{\text{п}}$ координатам. При включении системы стабилизации контуры колебаний осуществляют регулирование углов рассогласования дебалансов (рис. 3), что приводит к стабилизации амплитуд колебаний по двум линейным ($y_{\text{п}}$, $x_{\text{п}}$) и трем угловым ($\varphi_{\text{п}}$, $\psi_{\text{п}}$, $\chi_{\text{п}}$) координатам (рис. 4). Вместе с тем колебания $z_{\text{п}}$ несколько изменяются вследствие отсутствия соответствующего контура регулирования.

Список литературы

1. Базаров Н. Х. Теоретические аспекты создания автоматизированных виброэлектроприводов // Автоматизированный электропривод / Под общей ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Управление мехатронными вибрационными установками / Под ред. И. И. Блехмана и А. Л. Фрадкова. СПб.: Наука, 2001. 278 с.
3. Шестаков В. М., Алексеев Д. В., Елишкин А. Е. Разработка и исследование управляемой электромеханической системы двухроторного вибростенда // Электричество. 2006. № 7.
4. Шестаков В. М., Елишкин А. Е. Динамика автоматизированных электромеханических систем вибрационных установок / Под общ. ред. проф. В. М. Шестакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005.
5. Шестаков В. М., Елишкин А. Е. Разработка и исследование регулируемой электромеханической системы трехроторного вибростенда // Электричество. 2009. № 2.
6. Шёнфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы / Пер. с нем. под ред. Ю. А. Борцова. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

Д. А. Медведев, аспирант,

О. Ю. Осипов, канд. экон. наук,

директор ООО "Научно-производственная
фирма "ЮМО" (ООО "НПФ "ЮМО"),

Ю. М. Осипов, д-р техн. наук, проф.,

С. В. Щербинин, канд. техн. наук, доц.,

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
sherb@sbi.tusur.ru

Создание лазерных технологических комплексов по критерию цена/качество

Рассматриваются вопросы управления лазерным технологическим комплексом с многокоординатной манипулятор-платформой с использованием синергетического подхода к созданию математической модели системы управления.

Ключевые слова: многокоординатный манипулятор, дуговой электромехатронный модуль движения, эксплуатационные характеристики.

Введение

Для резки, сверления и гравировки, сварки и наплавки материала в изделиях и деталях сложной формы из металла, пластмасс, дерева, фаянса и т. п. актуальной является разработка лазерного технологического комплекса (ЛТК), включающего лазерную технологическую установку (ЛТУ) и операционный автомат многокоординатной манипулятор-платформы. В Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники совместно с НПФ "ЮМО" разработан и изготовлен работоспособный экспериментальный образец многокоординатного манипулятора (ММ) [1–6], который комплексируется с ЛТУ БетаМарк-2000 (рис. 1, см. третью сторону обложки). В настоящее время изучаются технологические процессы лазерной сварки, схемно-конструкторский состав элементов ЛТК, способы управления и их математическое описание [7, 8]. Рассмотрению целевой функции вида $G = F\{P(T), G(T)\}$ посвящены работы [3–5], в которых решались вопросы управления движением обрабатываемого изделия, тех или иных видов лазерной технологии обработки.

В настоящее время становятся актуальными разработки нового товара, сопровождающиеся оценкой качества получаемых технико-эксплуатационно-экономических характеристик (ТЭЭХ), т. е. соотношения необходимой цены потребления и получаемого качества нового товара [9].

Несомненно, сложность управления ЛТК должна быть сопоставима со сложностью объекта управления, включающего в свой состав устройство многокоординатного перемещения обрабатываемого изде-

лия и устройство лазерной обработки этого изделия. Очевидно, что объект управления является сложным, характеризуется по крайней мере двумя разными физическими процессами и ТЭЭХ, между которыми надо найти необходимый оптимум, обеспечивающий высокое качество технологического процесса ЛТК. Решение задачи совместного управления двумя физическими процессами с учетом цены потребления можно представить в виде целевой функции

$$G = f\{P(t), G(t), S(Q)\},$$

где $P(t) = P(q, \dot{q}, \ddot{q}, d) + \delta m$ — закон управления движением обрабатываемого изделия, зависящий от геометрических и динамических параметров технологической среды. Переменные q характеризуют параметры поступательного движения по прямой или дуге окружности; d — вектор, содержащий геометрические и динамические параметры операционного автомата (длины, массы, моменты инерции и т. д.); $G(t) = \eta_{эф} W$ — закон управления технологией лазерной обработки того или иного вида, эффективная тепловая мощность, выражающая количество теплоты, поступившей в материал за единицу времени при том или ином виде лазерной обработки (поверхностной термообработки без расплавления, обработке с расплавлением материала); $\eta_{эф}$ — эффективный КПД — отношение количества теплоты, поступившей в материал, к мощности лазерного излучения, воздействующего на обрабатываемую поверхность, характеризующее эффективность процессов выделения теплоты и теплообмена для любого процесса лазерной обработки; W — мощность лазерного излучения; $S(Q)$ — зависимость качества ЛТК и его составляющих от стоимости потребления, являющейся суммой затрат на изготовление и эксплуатацию.

Для тех видов лазерной обработки, которые связаны с "проплавлением" материала, эффективное использование поступившей в материал тепловой энергии характеризуется термическим КПД, который представляет собой отношение количества теплоты, необходимой для "проплавления", ко всей теплоте, поступившей в изделие: $\eta_T = VF_{пр}S_{пл}/G(t)$, где V — скорость лазерной обработки; $F_{пр}$ — площадь поперечного сечения проплавленной зоны материала; $S_{пл}$ — удельное объемное теплосодержание расплавленного металла, включая скрытую теплоту плавления.

Качество и стоимость потребления лазерного технологического комплекса

ТЭЭХ ЛТК с ММ описываются функцией $S(Q)$ — зависимостью качества ЛТК и его составляющих от стоимости потребления, являющейся суммой затрат на изготовление и эксплуатацию. Функция $S(Q)$ может быть описана большим числом факторов, из которых определяющими для ММ является конст-

Таблица 1

Сравнительная характеристика опор (в усл. ед.)

| Параметр | Тип опор | | | |
|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | Опоры с трением скольжения | Опоры с трением качения | Опоры с "воздушным трением" | Опоры с "магнитным трением" |
| Точность направления | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Момент сил трения | 3 | 2 | 1 | 1 |
| Температурная нечувствительность | 0 | 1 | 2 | 2 |
| Грузоподъемность | 2 | 3 | 2 | 2 |
| Износостойчивость | 0 | 1 | 3 | 3 |
| Вибростойкость | 1 | 1 | 4 | 5 |
| Сумма | $\Sigma \Theta_1 = 7$ | $\Sigma \Theta_2 = 10$ | $\Sigma \Theta_3 = 15$ | $\Sigma \Theta_4 = 16$ |

Таблица 2

Интегральные затраты в зависимости от вида опор

| Конструктивное исполнение | Затраты на изготовление, у. е. | Затраты на эксплуатацию, у. е. | Интегральные затраты, у. е. |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Опоры с трением скольжения | 6 | 4 | 10 |
| Шарикоподшипниковые опоры | 8 | 4 | 12 |
| Магнитные опоры | 9 | 8 | 17 |
| Воздушные опоры | 10 | 12 | 22 |

руктивное исполнение дугового электромагнетронного модуля движения (ДЭМД) — конструкция электродвигателя, виды опор, электронный блок управления, программное обеспечение и т. п. Рассмотрим оценку качества получаемых ТЭЭХ, основанную на анализе вида опор.

Конструкция ДЭМД представляет собой дуговой сегментный индуктор с трехфазной обмоткой и дуговой элемент из магнитомягкого материала с постоянными магнитами (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Опоры ДЭМД представляют собой устройства, обеспечивающие заданное движение дугового элемента с определенной точностью и заданную грузоподъемность. В зависимости от вида трения различают опоры: с трением скольжения (сталь-бронза, фторопласт-4 и т. д.); с трением качения (шарикоподшипниковые или роликоподшипниковые опоры); с трением упругости, с жидкостным или воздушным трением (магнитные и воздушные опоры и их модификации).

От конструкции опор зависят эксплуатационные характеристики ДЭМД и затраты на изготовление, следовательно, его цена. В зависимости от существующей технологии и производственных возможностей предприятия возможно применение в конструкции ДЭМД тех или иных видов опор. Для осуществления рационального выбора видов опор необходимо разработать эксплуатационную модель ДЭМД с эксплуатационными характеристиками, представленными в табл. 1, используя которую можно провести расчеты и соответствующую оптимизацию цены (табл. 2).

Расчеты эксплуатационных характеристик для каждого типа опор, интегральных эксплуатационных характеристик, затрат на изготовление, на эксплуатацию и интегральных затрат для этих опор выполняются по традиционным формулам по проектированию опор и опыта производства и эксплуатации подобных систем. В результате в условных единицах можно получить сравнительные характеристики опор и суммарных показателей эксплуатационных характеристик (табл. 1), значения затрат на изготовление, на эксплуатацию, интегральных затрат.

Можно построить графоаналитическую интерпретацию модели "затраты — эксплуатационные показатели", включающую в себя затраты на изготовление и эксплуатацию и эксплуатационные характеристики второго уровня: число степеней подвижности; грузоподъемность для четырех видов опор многокоординатной электромагнетроники. Для моделирования необходимо иметь [9]:

1) предельные значения затрат и показателей эксплуатационных характеристик;

2) значения эластичностей потребительских и производственных возможностей a и b , характеризующих относительные изменения экономических событий (примем, что $0 < a < 1$, $1 < b < 2$);

3) компьютерную программу, в которой запрограммированы формулы кривых потребительских желаний и производственных возможностей.

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) представлены совмещенные изображения кривых спроса и предложения для четырех опор, из которых можно выбрать рациональный для манипулятора тип опор. Для потребителя — это востребованные эксплуатационные характеристики изделия при относительной меньшей цене покупки и меньших затратах при эксплуатации, для производителя — это востребованные эксплуатационные характеристики изделия, обеспечивающие уровень конкурентоспособности на рынке и наивысшую прибыль без существенных перемен существующей технологии производства. Из рис. 3 можно найти возможную цену продаж и прибыль.

Заключение

Для конструктивного варианта ДЭМД с опорами с трением скольжения, в котором дуговой сегментный индуктор и дуговой элемент ротора соединены подвижно между собой с помощью опор скольжения, выполненных из фторопласта-4, интегральные затраты на производство и эксплуатацию ниже, чем у ДЭМД с другими опорами, но ниже и качество конструкции. Его можно применять в операционных автоматах, где не требуются точ-

ность, износостойчивость и т. п. Для конструктивных вариантов ДЭМД с более высокими точностными характеристиками перемещения, износостойчивостью и низкими потерями стоимость затраты на производство и эксплуатацию операционного автомата примерно в 1,5...2 раза превосходит ДЭМД с опорами скольжения.

Представленный подход к процессу проектирования операционных автоматов на примере анализа ТЭЭХ ДЭМД обладает уникальной возможностью разрабатывать, производить и эксплуатировать изделия с рациональным соотношением цена/качество.

Список литературы

1. Осипов Ю. М. Операционные автоматы с электроприводом прямого действия. Томск: ИПФ ТПУ, 1997. 200 с.
2. Патент РФ № 2093344 "Манипулятор-платформа" / Осипов Ю. М. и др. БИ № 29, 1997.

3. Щербинин С. В., Осипов Ю. М. Геометрическое обеспечение работы многокоординатных операционных автоматов // Автоматизация и современные технологии. 1999. № 8. С. 2—3.

4. Осипов Ю. М. Многокоординатные мехатронные модули движения // Матер. 1-й Росс. мультиконф. по управлению. Мехатроника, автоматизация, управление. 10—12 окт. 2006, Санкт-Петербург. 350 с. С. 157—158.

5. Осипов О. Ю., Осипов Ю. М. Лазерная технологическая установка с многокоординатным столом-манипулятором // Матер. 2-й Росс. мультиконф. по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. 14—16 окт. 2008. С. 251—253.

6. Васенин П. К., Медведев Д. А., Осипов Ю. М. Дуговой электромехатронный модуль движения // Доклады ТУСУР. 2008. № 1 (17). С. 58—62.

7. Щербинин С. В., Негодяев С. В., Осипов Ю. М. Элементы автоматизированной системы управления сваркой криволинейных швов // Доклады ТУСУР. 2007. № 2 (16). С. 42—49.

8. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособ. для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 664 с.

9. Осипов О. Ю., Осипов Ю. М., Уваров А. Ф. Формирование эксплуатационно-экономических требований к наукоемкой продукции // Вестник ТГПУ. Вып. 5 (49). Сер. гуманитарная (экон.). Томск: изд. ТГПУ, 2005. С. 43—44.



11-й Международный форум "Высокие технологии XXI века"



Форум пройдет с 19 по 22 апреля 2010 г.
в Центральном выставочном комплексе "Экспоцентр", павильон № 7

Миссия Форума — содействие развитию инновационных процессов, расширению международного диалога, развитию международного научно-технического и делового сотрудничества.

В рамках международного форума проводятся

◀ 3-я Международная специализированная выставка "НАНОТЕХНОЛОГИИ XXI — 2010"

Тематика экспозиции

- Наноматериалы и технологии их получения
- Наноматериалы и наносистемы для авиационно-космических систем, систем безопасности, вооружения и военной техники, машиностроения, строительства, автомобилестроения, судостроения
- Наноэлектроника
- Наномедицина и нанобиотехнология
- Наноматериалы и наносистемы для традиционной, атомной, водородной, солнечной энергетики
- Наноматериалы и наносистемы в экологии
- Методы, оборудование и приборы для формирования, исследования и диагностики наноструктур

◀ 4-я Международная специализированная выставка "ЭНЕРГИЯ XXI — 2010"

Тематика экспозиции

- Технологии атомной энергетики
- Технологии альтернативной энергетики и возобновляемых источников энергии (водородная, солнечная, альтернативные моторные топлива и др.)
- Энергоэффективные и энергосберегающие технологии и оборудование
- Энергетическое машиностроение
- Системы электро-, тепло-, газоснабжения
- Электротехническое оборудование
- Системы и средства измерения и контроля, управления и автоматического регулирования технологий безопасности энергообъектов и экологической безопасности

Подробная информация и условия участия в Выставке:

Тел.: (495) 332-36-81, 332-35-95, 331-23-33; Факс: (495) 331-05-11, 331-09-00
E-mail: anna-v@vt21.ru; vt21@vt21.ru

УДК 681.518.3

А. С. Тищенко, аспирант,
Б. Б. Михайлов, канд. техн. наук, доц.,
 Научно-учебный центр "Робототехника"
 МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва
 secutor@rbcmail.ru

Навигация мобильного робота на основе бортовой системы технического зрения

Рассматривается телевизионная система технического зрения для решения задачи навигации мобильного робота, в которой координаты робота определяются по направлениям на известные реперные точки. Описаны основные процедуры и алгоритмы обработки видеоинформации. Приведены результаты экспериментальных исследований образца системы с реальным роботом.

Ключевые слова: навигация, мобильный робот, система технического зрения, определение координат.

Введение

Одной из задач робототехники является применение мобильных роботов для выполнения разведывательных, инспекционных и спасательных работ в условиях, где пребывание человека небезопасно или невозможно. При этом робот должен уверенно перемещаться в реальной обстановке, которая в общем случае является недетерминированной.

На сегодняшний день выполнено множество исследований и разработаны алгоритмы управления, обеспечивающие решение таких нетривиальных задач, как планирование траектории движения робота, обход препятствий, прецизионное движение по сложным криволинейным траекториям, проникновение в труднодоступные зоны. Однако большинство разработанных алгоритмов эффективны только в случае, если робот обладает полной информацией о своем местоположении в рабочей зоне.

Проблема навигации мобильных роботов, работающих автономно в недетерминированных средах, стоит сегодня достаточно остро. Существующие системы основаны, как правило, либо на методах счисления пути, либо на использовании в зоне действия робота специальных активных или пассивных устройств. Основными недостатками этих методов являются невысокая точность, сложность установки и необходимость обслуживания при работе.

Навигация с использованием системы технического зрения

Авторы считают, что одним из самых перспективных подходов к автономной навигации мобильных роботов является использование систем технического зрения (СТЗ), позволяющих по визуальной информации определить текущее положение робота в рабочей зоне.

Предлагаемый подход заключается в следующем: координаты робота определяются относительно нескольких расположенных вокруг рабочей зоны неподвижных объектов (реперов), координаты которых известны или могут быть измерены традиционными способами. В качестве реперов можно использовать любые контрастные объекты, которые хорошо видны и имеют характерные очертания. Примером может служить отдельно стоящее дерево или строение. Если таких объектов нет, то можно установить реперы на границе рабочей зоны или в месте старта. Для однозначного определения положения робота таких реперов должно быть не менее трех. Координаты реперов заносятся в память бортовой СТЗ до начала движения. В процессе определения координат система анализирует рабочее пространство, находит реперы и определяет направление на каждый из них. На основании измеренных углов и известных координат реперов вы-

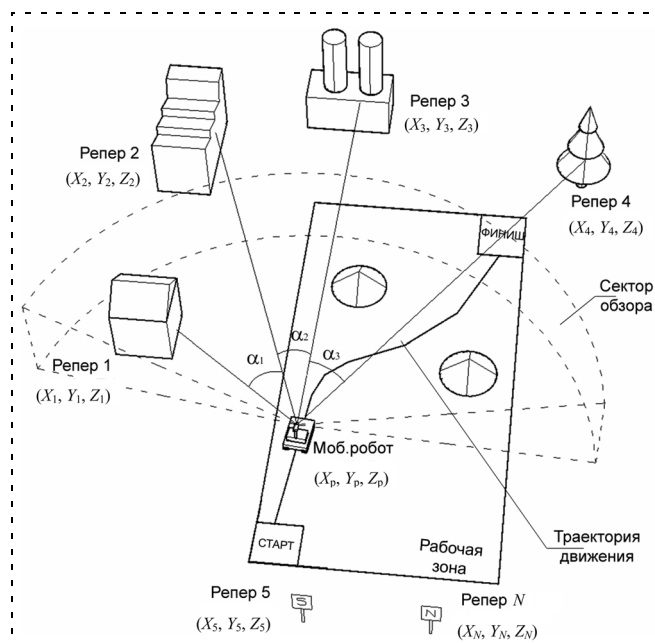


Рис. 1. Навигация мобильного робота с помощью СТЗ

числяется собственное положение мобильного робота в рабочей зоне. Иллюстрация этого способа дана на рис. 1.

Основными характеристиками такой СТЗ являются:

- сектор обзора (α);
- размер рабочей зоны системы;
- быстродействие или частота определения координат (f);
- погрешность определения углов направлений на реперы (m_Δ);
- ошибка определения координат робота (M_p).

Реализация предложенного подхода требует решения на борту робота двух основных задач:

- поиск реперов на изображении рабочей сцены и определение углов-направлений на них;
- вычисление координат робота по известным координатам реперов и полученным углам-направлениям.

Поиск реперов на изображении рабочей сцены

При анализе динамических изображений предъявляются очень жесткие требования ко времени обработки, что в полной мере относится к данной задаче. Вместе с тем, рабочая сцена робота и искомые объекты трудно поддаются формальному описанию, так как их размеры, местонахождение и ориентация в общем случае заранее неизвестны и изменяются в процессе движения. В этих условиях большинство известных методов распознавания изображений [4—7] оказываются малоэффективны, поскольку они основаны на выделении характерных признаков для классификации объектов и требуют длительных вычислений. С учетом этого в настоящей работе для реализации задачи идентификации реперов был выбран аппарат автокорреляционных функций. Применение данного математического аппарата позволило значительно увеличить скорость работы СТЗ за счет исключения этапов предварительного описания, выделения признаков и распознавания реперов.

В качестве базового уравнения для автокорреляционной функции (АКФ) было взято классическое уравнение свертки для двумерного случая:

$$C(\tau) = \int_S g(s)f(s - \tau)ds, \quad (1)$$

где $g(s)$, $f(s - \tau)$ — функции, определенные в двумерной области S ; τ — относительное смещение функции.

Для работы с изображениями была использована дискретная форма данного выражения — коэффициент корреляции

$$C(k, l) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m G(i, j)F(i - k, j - l), \quad (2)$$

где $G(i, j)$ — эталонное (заданное) изображение репера (прямоугольная область размером $m \times n$); $F(i, j)$ — фрагмент текущего изображения рабочей сцены; k, l — смещение фрагмента относительно эталонного.

Для исключения влияния размеров изображения репера на значение АКФ был введен нормирующий коэффициент $S = nm$.

При реализации формулы (2) в качестве меры совпадения исследуемого фрагмента с эталонным были взяты коэффициенты корреляции, которые вычисляются по формулам

$$C(k, l) = \frac{\sum \Delta}{S}, \quad \text{где } \Delta = \begin{cases} 1, & |I_{0ij} - I_{ij}| \leq A; \\ 0, & |I_{0ij} - I_{ij}| > A; \end{cases} \quad (3)$$

$$C(k, l) = \frac{\sum 2^\Delta}{S}, \quad \text{где } \Delta = \begin{cases} -|I_{0ij} - I_{ij}|, & \text{если } |I_{0ij} - I_{ij}| \leq A; \\ -\infty, & \text{если } |I_{0ij} - I_{ij}| > A. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь I_{0ij} — яркость пикселя с координатами (i, j) в эталонном окне; I_{ij} — яркость пикселя в текущем окне; A — максимально допустимая разница в яркостях пикселей, при которой они считаются идентичными.

Вид АКФ при перемещении окна сравнения, содержащего эталонное изображение репера (в данном случае белый прямоугольник), по изображению рабочей сцены показан на рис. 2.

При работе с реальными изображениями АКФ обладает большим числом локальных максимумов и не является гладкой (рис. 2). За счет введения параметра A удалось снизить число локальных мак-

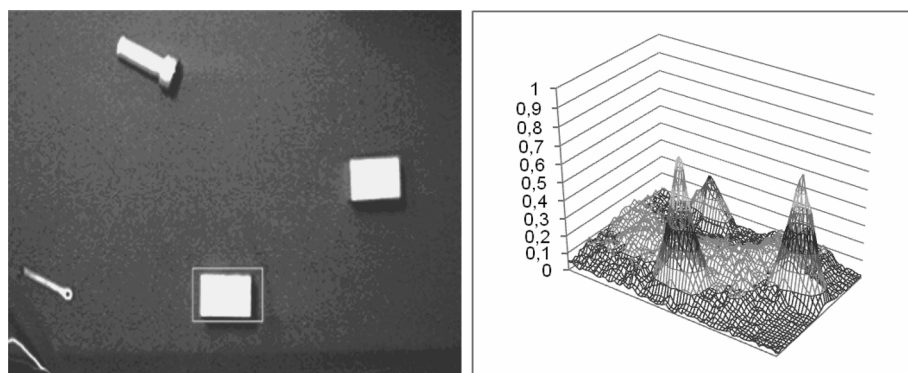


Рис. 2. Вид автокорреляционной функции

симумов функции и увеличить ее среднее значение, в том числе в зоне шумов. Экспериментальные исследования соотношений уровня шумов и значения глобального максимума АКФ при различных A , полученных на реальных изображениях, показывают, что допустимое значение A должно составлять 10...15 % диапазона яркости для данного уровня квантования видеосигнала. При этом приемлемым считается уровень шумов не более 30 % от значения глобального максимума. Использование параметра A в формуле (3) дает значительное улучшение ее поведения в окрестностях глобального максимума. Для формулы (4) это улучшение носит менее заметный характер вследствие степенной зависимости от разности яркостей пикселей (рис. 3).

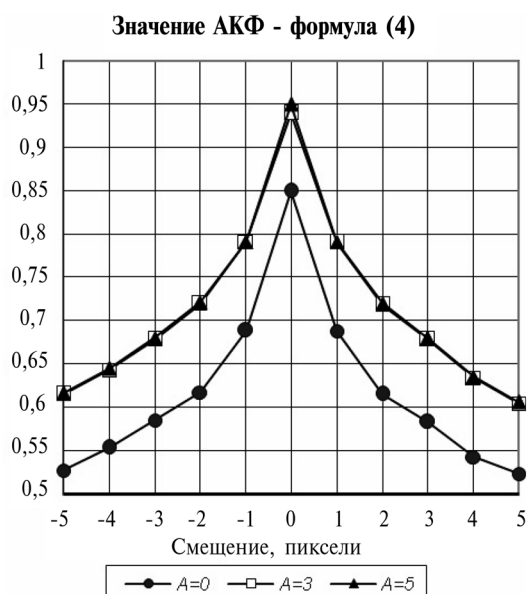
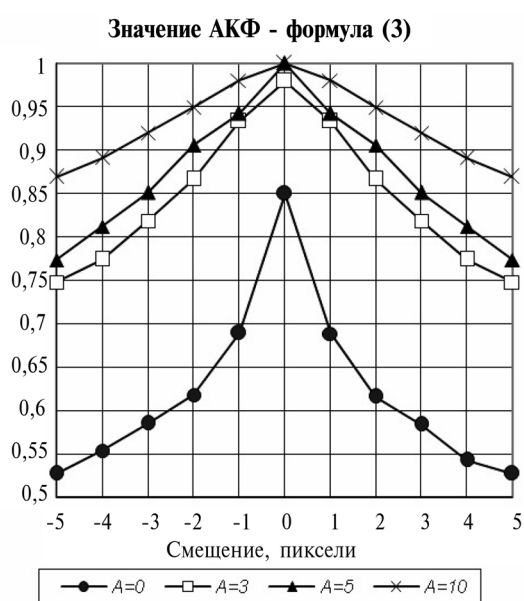


Рис. 3. Поведение АКФ в области глобального максимума

Важнейшей характеристикой для системы является допустимое искажение изображения репера. Очевидно, что при движении робота возникают повороты изображения реперов, а также изменяются их линейные размеры при приближении к реперу или удалении от него. Также может возникнуть ситуация, когда угол поворота изображения репера на двух последовательно полученных изображениях составит существенное значение, например, в случае наезда мобильного робота на препятствие или при попадании шасси в яму. Для обеспечения устойчивой работы алгоритма необходим учет линейных и угловых искажений изображений репера. Поэтому на каждом шаге работы алгоритма предыдущее эталонное изображение репера стирается из памяти СТЗ и заменяется последним найденным изображением этого репера.

Для определения максимального периода смены эталонных изображений было проведено исследование поведения АКФ при изменении размеров репера. Оно также показало, что эффективность обнаружения реперов зависит от их формы. В частности, среди простейших геометрических форм (круг, квадрат, прямоугольник и крест) наилучшей формой для репера является крестообразная, у которой значение глобального максимума АКФ при однотипных искажениях изображения в среднем на 5...10 % выше. Эффективности обнаружения реперов в форме прямоугольника, квадрата и круга примерно одинаковы и отличаются незначительно. Впрочем, следует отметить, что использование реперов в форме круга особенно эффективно при поворотах изображения репера относительно оптической оси объектива телекамеры на значительный угол (например, в случае крена мобильного робота).

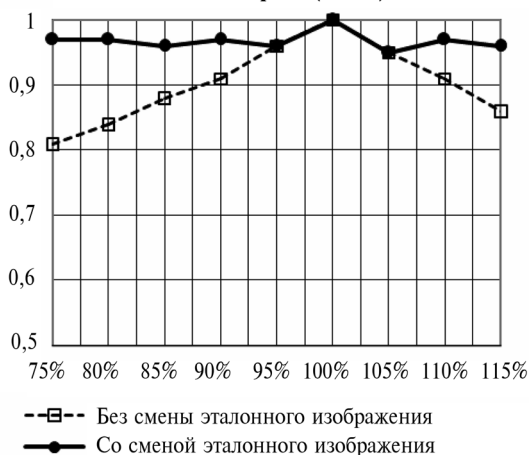
Экспериментальные исследования показали, что для устойчивого обнаружения репера смена его эталонного изображения в системе должна осуществляться с частотой, при которой линейные размеры объекта изменяются не более чем на 10...15 %. Период смены эталонного изображения репера может быть определен на основании скорости мобильного робота и расстояния до репера. В качестве иллюстрации на рис. 4 показана эффективность работы такого подхода для изображения репера в виде креста при $A = 5$ с фиксированным эталонным изображением и периодически обновляемым изображением репера.

В случае, если приблизительное положение репера на изображении неизвестно, его поиск должен осуществляться путем последовательного сканирования всего изображения. Такой подход имеет некоторые преимущества: в частности, это простота программирования и большая вероятность найти

репер на изображении (если он присутствует на рабочей сцене). Однако данный способ ведет к недопустимым временным затратам.

Для уменьшения времени обработки было использовано предварительное сжатие всего изображения: фрагмент размером 2×2 представлялся как один пиксель. Это уменьшило размеры изображения и сократило время поиска изображения репера в 4...8 раз в зависимости от его начальных размеров. Недостатком данного подхода было снижение точности определения координат репера. Поэтому после грубого определения положения заданного фрагмента на сжатом изображении выполнялся поиск репера на исходном изображении в небольшой локализованной области, что значительно

Значение АКФ - формула (3)
Масштабирование объекта
Объект - Крест ($A = 5$)



Значение АКФ - формула (3)
Поворот объекта
Объект - Крест ($A = 5$)

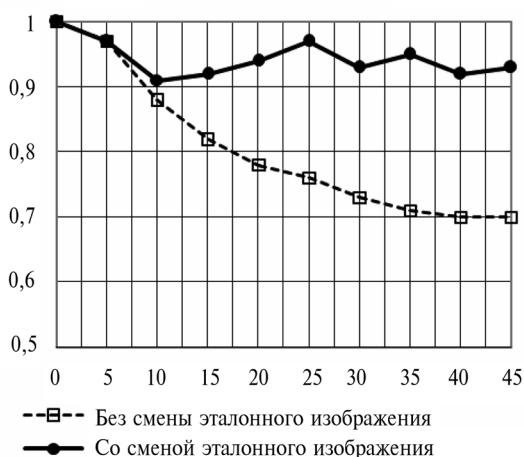


Рис. 4. Поведение АКФ при линейных и угловых искажениях изображения репера

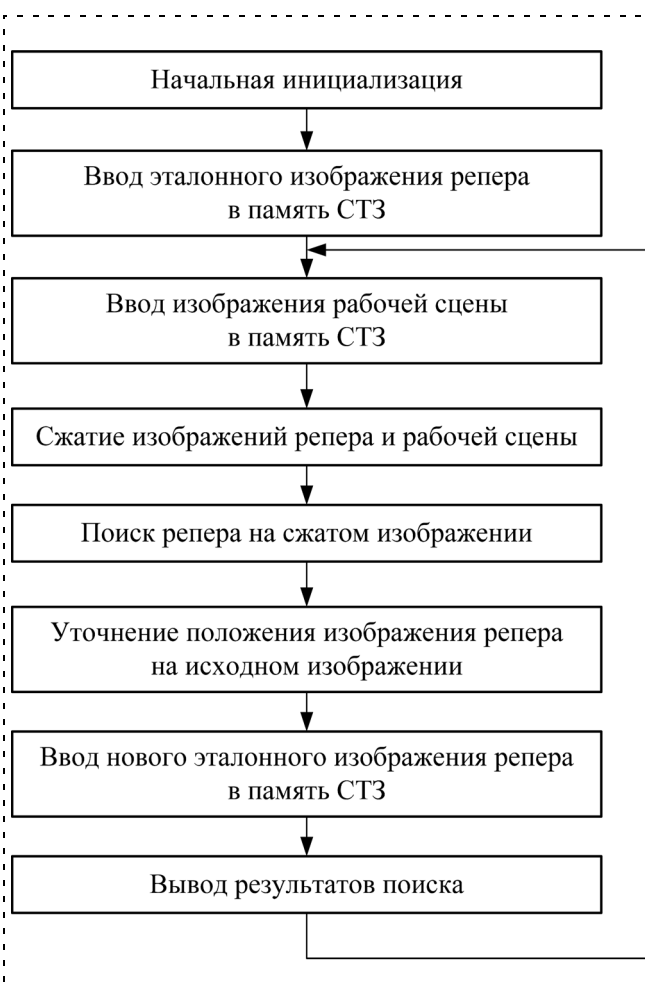


Рис. 5. Алгоритм вычисления координат репера на изображении

снизило затраты времени на обработку изображения. Окончательный алгоритм процедуры поиска репера на изображении рабочей сцены представлен на рис. 5.

Вычисление координат мобильного робота

Вычисление координат мобильного робота в пространстве — вторая задача, которая решается бортовой СТЗ. Изображения и координаты реперов, относительно которых осуществляется определение положения робота, измеряются традиционными способами и заносятся в память бортовой СТЗ до начала движения в точке старта. Далее, используя рассмотренный выше алгоритм, определяются координаты реперных точек на изображении и направления на них, т. е. углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (см. рис. 1). Зная координаты этих реперов в пространстве рабочей зоны (X_i, Y_i, Z_i) и углы-направления, аналитически можно вычислить координаты точки, соответствующей положению робота (X_p, Y_p, Z_p). Для достижения однозначности решения задачи необ-

ходимо иметь не менее трех реперов с известными координатами.

Авторы предлагают решать данную задачу через последовательное решение типовой геодезической задачи для трех линейных засечек. При этом используются простые формулы и соотношения, что позволяет обеспечить высокую скорость работы системы [2, 3]. Для данного способа также получены формулы оценки точности определения координат робота. Ошибка определения координат робота M_p

зависит как от погрешности определения углов направлений на реперы m_Δ , так и от взаимного расположения реперов и положения робота в пространстве рабочей зоны [2].

Поскольку изображение репера считывается с помощью телекамеры СТЗ, ошибка измерения любого угла направления имеет две основные составляющие: $\Delta_{пр}$ — ошибку датчика привода поворота телекамеры (если бортовая камера робота установлена на поворотной платформе); Δ_p — ошибку определения координат репера в поле зрения телекамеры (на изображении рабочей сцены). Так как составляющие независимы, максимальная погрешность измерения угла определяется выражением

$$m_\Delta = |\Delta_{пр}| + |\Delta_p|.$$

Величина $\Delta_{пр}$ определяется разрешающей способностью датчика привода платформы. При этом ее значение не зависит от точности обработки привода поворота телекамеры, а определяется исключительно погрешностью самого датчика. Поэтому даже при неточной обработке положения ошибка не возрастает.

Вторая составляющая Δ_p — ошибка определения положения репера на текущем изображении рабочей сцены. Она измеряется в пикселях и, в свою очередь, зависит от:

- значения искажения изображения репера относительно эталонного;
- размера и формы изображения репера;
- разрешающей способности телекамеры (размера изображения рабочей сцены).

Зависимость носит сложный характер и различается для разных форм реперов. Было выявлено, что если линейные размеры изображения репера при движении мобильного робота не будут меняться более, чем на 15 %, то СТЗ находит репер с погрешностью, не превышающей два пикселя по каждой оси координат (размер изображения рабочей

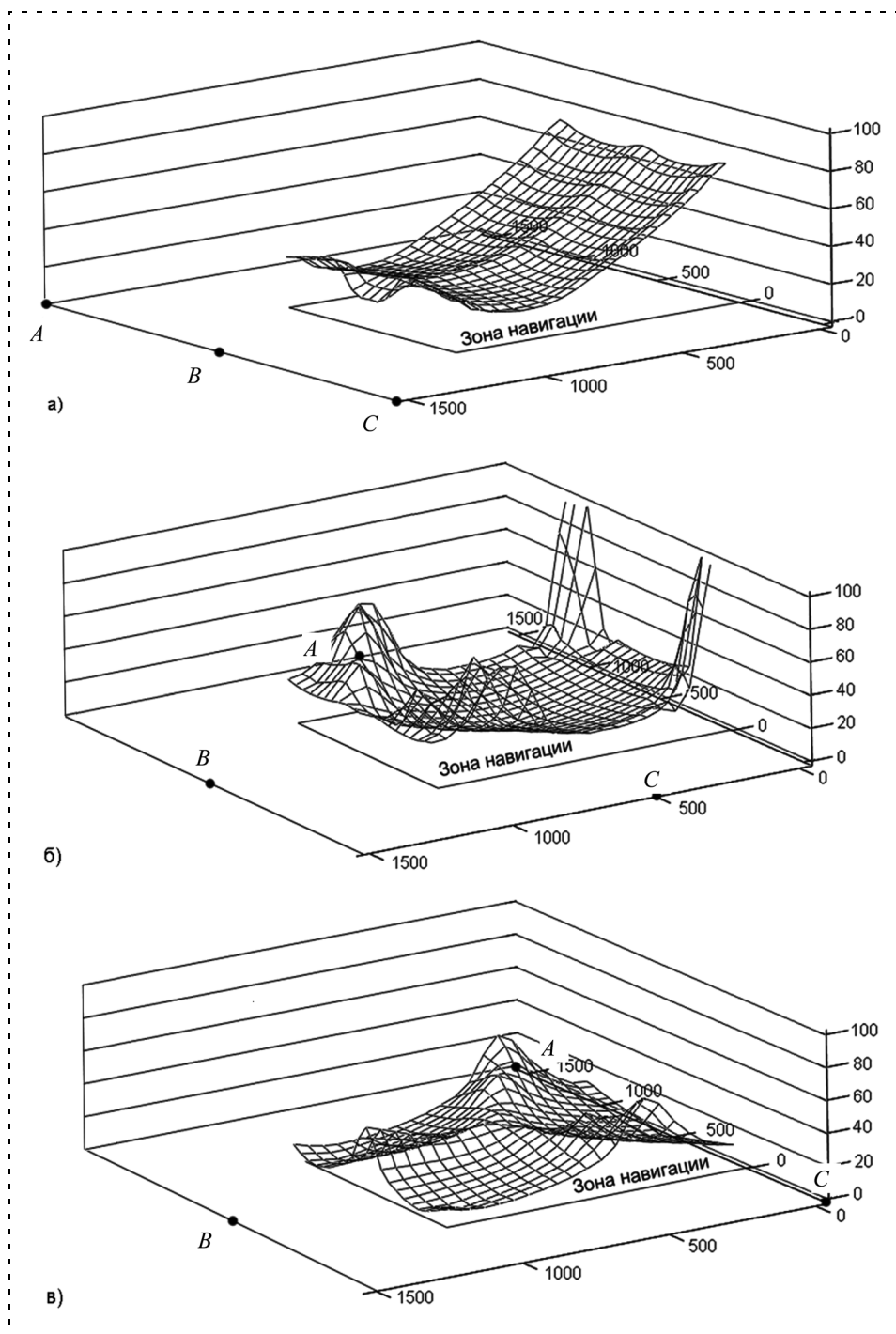


Рис. 6. Зависимость ошибки измерения координат робота M_p для различных положений реперов (в см)

сцены 320×200 пикселей). Таким образом, для телекамеры с углом зрения 90° , разрешением 320×200 пикселей получаем $\Delta_p = 0,56^\circ$ ($0,01$ рад.). При использовании 10-разрядного датчика угла поворота привода телекамеры значение $\Delta_{пр}$ составит $0,35^\circ$ ($0,006$ рад.). В этих условиях суммарная максимальная погрешность измерения углов направлений на реперы составит $m_\Delta = 0,91^\circ$ ($0,016$ рад.).

На рис. 6 приведены зависимости величины M_p для нескольких положений реперов A , B и C при изменении координат мобильного робота (X_p , Y_p) в диапазоне $0 \dots 10$ м и погрешности измерения углов $m_\Delta = 1^\circ$. Как видно из рис. 6, величина M_p в значительной степени зависит от расположения реперов и может изменяться монотонно в зоне навигации (рис. 6, а) или иметь выраженные экстремумы (рис. 6, б и 6, в). При правильном выборе точек расположения реперов ошибка M_p имеет значения менее $0,2$ м при движении по области размером 10×10 м. Но существуют и такие варианты расположения реперов, при которых погрешность определения координат робота значительно возрастает, как показано на рис. 6, б, где M_p превышает значение $0,5$ м. В этом случае необходимо найти новые реперы, либо использовать другие формулы для вычисления координат [2].

Таким образом, зная погрешность определения угла направления на репер для выбранной телекамеры, можно еще до начала движения рассчитать для конкретных реперов значение потенциальной ошибки определения положения робота при его движении в пространстве рабочей зоны. Если оно меньше, чем допустимая ошибка, то можно начинать движение. В противном случае необходимо либо уменьшить m_Δ , используя более качественные аппаратные средства, либо выбрать другие реперы, которые дают меньшую ошибку измерения.

Если же набор реперов ограничен и нет возможности выбрать новый, то можно указать системе управления движением робота такие области рабочей зоны, где нельзя использовать результаты измерения системы технического зрения. В этих областях мобильный робот может двигаться в автоматическом режиме, оценивая свое положение другими методами. Таким образом, взаимное расположение реперов является важным критерием для их выбора. В развитие этого вывода следует добавить: если область, по которой будет двигаться мобильный робот, доступна для расстановки реперов, то на основе предварительного анализа можно указать точки, где их размещение наиболее предпочтительно. Отметим, что система сама может выбирать различные реперы в процессе движения робота исходя из требований к точности.

Экспериментальные исследования системы зрения

Экспериментальные исследования разработанного метода определения координат проводились на макетном образце СТЗ, который состоял из компьютера (процессор Intel Pentium 4), платы видеозахвата VT878, обеспечивающей ввод изображения в режиме прямого доступа к памяти в формате 320×240 пикселей, черно-белой ПЗС-камеры ТСВ-3022 (1/3" SONY Super HAD). С камерой использовался объектив TAMRON 13VM2812AS с изменяемым фокусным расстоянием $2,8 \dots 12$ мм. Данный объектив обеспечивает угол обзора $24,1^\circ \dots 97,4^\circ$ по горизонтали и $18,1^\circ \dots 72,5^\circ$ по вертикали.

В процессе работы с камерой и объективом было выявлено, что получаемое изображение имеет существенные нелинейные искажения (бочкообразные), особенно заметные на его краях. Кроме того, реальный угол обзора камеры по горизонтали при фокусном расстоянии $2,8$ мм составляет $92,3^\circ$ и изменяется по полю изображения: в верхней и нижней частях изображения угол обзора составляет более 96° . Поэтому для точного вычисления углов была выполнена калибровка камеры и получена таблица перевода линейных координат изображения в угловые координаты $\alpha_i = f\{x_j\}$. В точках, находящихся между табличными значениями, проводилась линейная интерполяция по ближайшим соседним значениям. Таким образом, удалось устранить составляющую ошибки определения углов направлений на реперы, обусловленную дисторсией.

Программная часть СТЗ состоит из трех основных наборов компонентов:

- функций работы с платой видеозахвата и консолью;
- процедур обработки изображения;
- процедур вычисления и вывода координат.

Для реализации всех упомянутых компонентов используется операционная система Microsoft Windows и компилятор Visual C++ .NET 2003 (7.1) Copyright (c) Microsoft Corporation.

Экспериментальные исследования СТЗ осуществляли в помещении размером 8×11 м. В нем было установлено три репера, выбрана точка начала отсчета и относительно нее измерены координаты реперов (в см). По известным координатам реперов в помещении система определяла "собственные" координаты. Полученные координаты (X_p , Y_p) сравнивали с заданным положением камеры ($X_{рз}$, $Y_{рз}$) и определяли точность системы зрения.

На рис. 7 приведены рассчитанные значения ошибок определения координат при движении робота параллельно оси X (рис. 7, а) и Y (рис. 7, б). Далее на эту расчетную область наложены данные, полученные от системы технического зрения при проведении эксперимента. Как видно из рис. 7, бо-

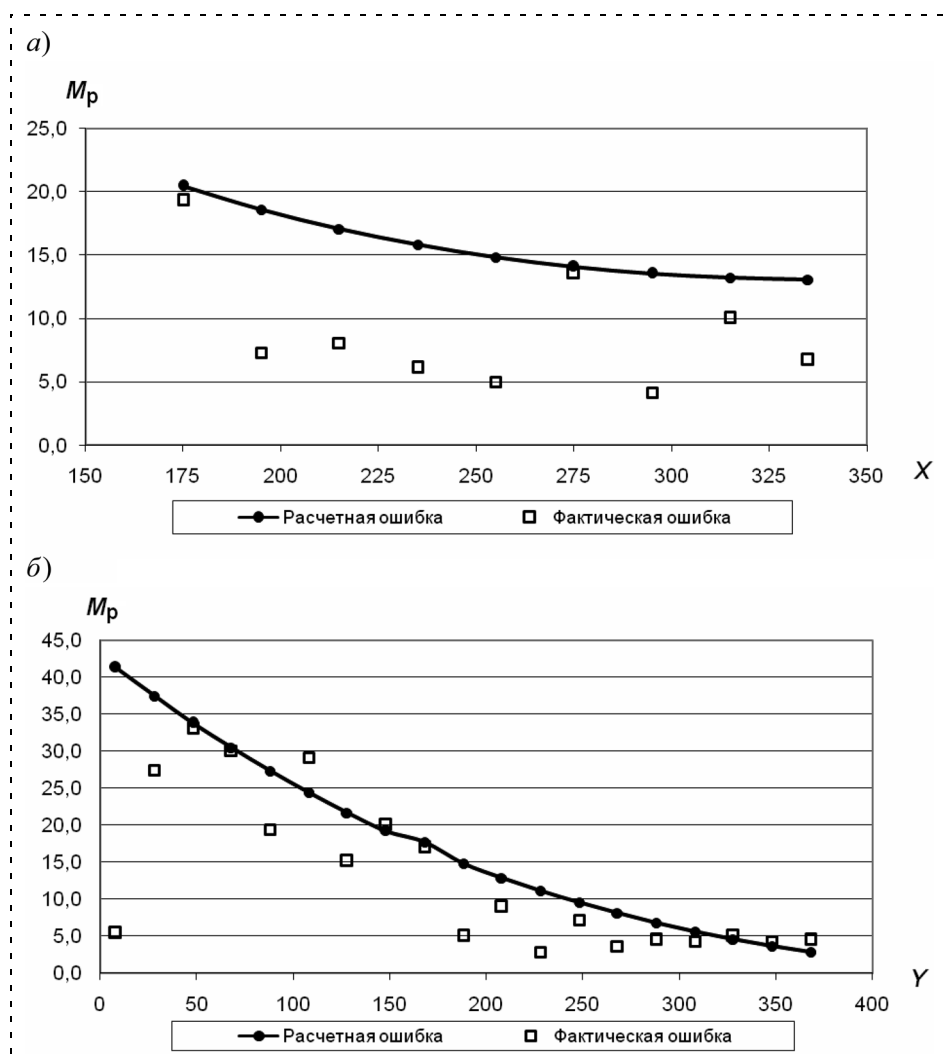


Рис. 7. Расчетная M_p и фактическая ошибки определения координат робота при движении параллельно оси X (а) и параллельно оси Y (б)

лее 85 % измерений попали в расчетную область. Поиск реперов и вычисление координат осуществляется за 0,1...0,4 с в зависимости от размеров реперов.

Макет навигационной СТЗ был установлен на шасси мобильного робототехнического комплекса "Варан" (разработка НИИ СМ МГТУ им. Н. Э. Баумана). В результате совместных испытаний была экспериментально подтверждена возможность управления роботом при выполнении следующих действий:

- движение по прямой до заданной точки;
- движение по заданной траектории;
- проезд через препятствие "барьер" с пониженной скоростью;
- остановка перед препятствием "стена";
- объезд препятствия "блок".

Заключение

Во всех перечисленных случаях робот отслеживал и при необходимости корректировал свое положение в пространстве рабочей зоны с помощью навигационной СТЗ, не используя информацию других датчиков. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность разработанных алгоритмов в реальных условиях. При этом установленный макет системы навигации обеспечивает точность позиционирования робота не хуже 5...15 см при движении внутри помещения, в котором установлены искусственные реперы.

Список литературы

1. Тищенко А. С., Михайлов Б. Б. Алгоритм поиска объектов для навигации мобильного робота в экстремальных условиях с помощью системы технического зрения // Экстремальная робототехника. Матер. XIII науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. С. 258—264.
2. Тищенко А. С. Навигация мобильного робота в недетерминированной среде с помощью системы технического зрения // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Тр. VII Всеросс. науч.-практ. конф. Т. 4. "Экстремальная робототехника". НПО Спец. материалов, СПб, 2004. С. 226—231.
3. Дьяков Б. Н. Геодезия. Общий курс: Учеб. пособ. для вузов. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 171 с.
4. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989. 487 с.
5. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
7. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Изд. дом "Вильямс", 2004. 928 с.
8. Everett H. R. Sensors for Mobile Robots: Theory and Application, ISBN 1-56881-048-2, A K Peters, Ltd., Wellesley, MA, 1995.
9. Borenstein J., Everett H. R., Feng L. Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning. The University of Michigan, 1996.
10. Dixon J., Henlich O. Mobile Robot Navigation. Imperial College, London, 1997.



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Левин Д. Н., Пономаренко А. В., Сильвестров М. М.

Концептуальный облик и особенности построения диалоговых моделирующих комплексов и действующего макета кабины для эргономического сопровождения разработки эргатического информационно-управляющего комплекса перспективного многофункционального маневренного самолета 52

Грибков В. Ф., Корнеев Н. И., Шестопалов Е. В.

Математическая модель бортовой радиолокационной станции для базы знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы 60

Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И.

Особенности менеджмента качества и сертификации бортовых систем воздушных судов 66

Д. Н. Левин, зам. нач. отдела,
ОАО "ОКБ Сухого", Москва,

А. В. Пономаренко,
д-р техн. наук, нач. отделения,
ОАО "РСК "МиГ", Москва,

М. М. Сильвестров,
д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,
"НИИ авиационного оборудования", г. Жуковский
rskmig@rambler.ru

Концептуальный облик и особенности построения диалоговых моделирующих комплексов и действующего макета кабины для эргономического сопровождения разработки эргатического информационно-управляющего комплекса перспективного многофункционального маневренного самолета

Рассматриваются вопросы создания и применения диалоговых моделирующих комплексов, действующего макета кабины перспективного маневренного самолета, унифицированного специализированного тренажера для сквозного поэтапного эргономического сопровождения разработки эргатического информационно-управляющего комплекса перспективного многофункционального маневренного самолета с использованием целеантропоцентрической методологии, направленной на рациональное согласование совокупного свойства взаимодействия человека-оператора, техники и модуля формирования цели управления (образа-цели).

Ключевые слова: целеантропоцентрическая методология, эргатический информационно-управляющий комплекс, модуль формирования цели управления, информационно-управляющее поле, диалоговый моделирующий комплекс, действующий макет кабины, унифицированный специализированный тренажер, диалоговый комплекс поискового моделирования, информационная модель, мнемокадр, индикационные кадры, имитатор неинструментальной информации, модуль синтеза законов управления.

Создание перспективного самолета в соответствии с многофункциональной концепцией применения авиации предусматривает расширение его возможностей в части применения бортовых средств поражения высокоскоростных маневренных целей с большой высотой полета, малоскоростных низколетящих малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (ЛА), наземных и морских подвижных и неподвижных целей, а также в части повышения безопасности полета на предельно малой высоте над сложным рельефом местности с использованием

цифровой картографической информации о рельефе местности.

Для повышения эффективности деятельности экипажей и безопасности полета модернизируемых и перспективных ЛА необходимо широкое применение диалоговых моделирующих комплексов и специализированных моделирующих стендов для отработки функционирования эргатического информационно-управляющего комплекса многофункционального маневренного самолета с использованием современной целеантропоцентрической методологии [2] создания информационно-управляющих полей (ИУП) и информационно-управляющих комплексов ЛА, учитывающей важность и приоритетность не только человеческого и технического факторов, но и способов решения целевых задач комплекса.

Эта методология направлена на рациональное согласование взаимодействия человека-оператора, техники и модуля формирования цели управления (образа-цели), принципы функционирования которого могут реконфигурироваться в процессе управления авиационным комплексом в зависимости от изменения целевых задач, условий и факторов, определяющих эффективность эргатического комплекса и повышение безопасности полета. В эргатическом комплексе управления должно обеспечиваться формирование и поддержание целенаправленности летчика на выполнение тех задач, для которых предназначен комплекс, а решаемые задачи должны соответствовать возможностям человека по использованию техники.

Методология базируется на:

- широком применении диалоговых моделирующих комплексов для отработки информационно-управляющего бортового оборудования ЛА;
- создании действующего макета кабины, позволяющего на ранней стадии создания перспективного самолета сформировать ИУП кабины, отработать логику взаимодействия летчика с бортовым оборудованием, подготовить летный состав к натурным испытаниям в интересах повышения эффективности эргономических исследований информационно-управляющего комплекса, сокращения объема натурных испытаний и повышения уровня зачетности натурных экспериментов;
- использовании сквозного поэтапного эргономического сопровождения разработки, создания, лабораторных и летно-конструкторских испытаний интегрированного бортового комплекса ЛА с одновременным созданием и развитием унифицированного специализированного тренажера для освоения экипажем летной деятельности с отработанным и принятым для летной эксплуатации информационно-управляющим бортовым оборудованием ЛА.

Особенности построения и использования диалоговых моделирующих комплексов для инженерно-психологических исследований

Моделирующие комплексы для инженерно-психологических исследований создают на основе моделирования в реальном масштабе времени с включением в контур моделирования как образцов реального оборудования ЛА, так и его имитаторов.

В комплекс входят: система математического моделирования процессов информационного обеспечения, управления и применения летательного аппарата, рабочее место экипажа (макет кабины самолета), а также системы визуализации, имитации и моделирования факторов полета, управления экспериментом, автоматизированной обработки полетной и психофизиологической информации, регистрации параметров процесса управления и функционального состояния оператора.

Математические модели процессов управления и боевого применения должны обеспечивать исследуемое многообразие режимов и законов управления и давать возможность без предварительной перестройки переходить с одних вариантов и режимов управления на другие по выбору летчика с его рабочего места или по выбору экспериментатора с пульта управления экспериментом. В наших моделирующих стендах для этого используется специальный модуль синтеза законов управления. Математическая модель систем автоматизированного управления выделяется в отдельный блок программ.

Блочное построение математических моделей управления и боевого применения летательного аппарата в виде отдельных блоков (модулей) самолета, двигательной установки, системы управления, режимов применения и т. п. обеспечивает гибкость в преобразовании состава и сложности моделей при исследованиях, а также возможность моделирования на ЦВМ высокочастотных процессов в сочетании с менее динамичными при рациональном использовании машинного времени и применении различного шага интегрирования в различных группах блоков. Для комплексных инженерно-психологических исследований целесообразно создавать математическую модель, обеспечивающую пространственное движение ЛА без ограничения углов поворота в условиях воздействия возмущений в широком диапазоне.

Информационная модель в составе моделирующего комплекса должна обеспечивать все виды операторской деятельности, иметь информационное и динамическое подобие систем отображения информации (СОИ) и визуализации реальным информационным моделям. Принцип построения инфор-

мационной модели комплекса должен позволять изменять форму представления информации в СОИ и обрабатывать мнемокадры (индикационные форматы), а также проводить инженерно-психологическую оценку опытных образцов элементов ИУП и разработку рекомендаций по построению ИУП.

ИУП, органы управления и оборудование, с которым непосредственно работает экипаж в процессе управления и применения ЛА, образуют рабочее место. В моделирующем комплексе рабочее место представляет собой макет кабины в виде физической модели реальной кабины. При ее разработке необходимо учитывать, что макет кабины должен позволять проводить медико-технические исследования, направленные на оптимизацию рабочего места и интерьера кабины на основе моделирования условий деятельности экипажа. На рабочем месте должна создаваться рабочая среда, предоставляющая собой совокупность факторов внешней среды, воздействующих на человека-оператора. Важно создавать не только условия управления ЛА, но и условия работы на борту ЛА, не связанные непосредственно с управлением, а также задавать дополнительную работу для определения резервов внимания летчика на различных режимах полета и деятельности.

В соответствии с принципами имитации движения ЛА, воспринимаемого летчиком, моделирующие пилотажные комплексы [1] можно разделить на:

- статические (с неподвижной кабиной);
- динамические с подвижной кабиной, моделирующей угловые ускорения и высокочастотные линейные перегрузки;
- динамические с кабиной, установленной на плече центрифуги, воспроизводящей перегрузки маневрирования в полете.

В статических моделирующих комплексах воспроизведение информации о движении самолета осуществляется с помощью систем отображения информации и визуализации, а также имитаторов неинструментальной информации. Имитация линейных ускорений может проводиться путем изменения надува противоперегрузочного костюма, а знакопеременных перегрузок — путем перемещения сидения кресла в диапазоне ± 50 мм пневматическим устройством, имитация эффекта "серой" и "черной" пелены — посредством изменения освещенности в кабине и яркости мнемокадров и изображения внешней обстановки в системе визуализации.

На динамическом моделирующем пилотажном комплексе с подвижной кабиной низкочастотная (эволютивная) составляющая движения воспроизводится с помощью отображения информации на

элементах ИУП кабины и системы визуализации, а высокочастотная составляющая с малыми перемещениями воспроизводится подвижной кабиной, что позволяет летчику (оператору) "чувствовать" угловые и линейные ускорения модели самолета. На стендах с подвижной кабиной порог восприятия [1] линейного ускорения составляет $0,06...0,12 \text{ м/с}^2$ при времени воздействия $0,8...4 \text{ с}$, абсолютный порог восприятия углового ускорения по крену составляет $0,13...0,7^\circ/\text{с}^2$ при времени воздействия $2...4 \text{ с}$, и порог восприятия угловой скорости движения находится в диапазоне $0,6...2^\circ/\text{с}$.

Схема динамического моделирующего комплекса с кабиной, установленной на плече центрифуги, содержит систему моделирования, систему формирования сигналов управления вращением центрифуги и поворотом макета кабины и другие системы. Комплекс обеспечивает воздействие перегрузок на летчика в соответствии с динамикой управления, и поэтому он в основном предназначен для исследования процессов управления при маневрировании, когда значительные по величине перегрузки могут накладывать ограничения и приводить к изменению управляющих характеристик летчика.

Применение динамических моделирующих комплексов позволяет более достоверно имитировать условия пилотирования и боевого применения ЛА на наиболее сложных этапах полета, а также при воспроизведении внештатной ситуации. Имитация акселерационных ощущений на моделирующих комплексах повышает их роль и значение при инженерно-психологических исследованиях, отработке эргатического информационно-управляющего комплекса и отображении информации на ряде важных этапов полета (взлет, посадка, пилотирование в турбулентной атмосфере).

Для системных инженерно-психологических исследований необходимы динамические моделирующие комплексы ЛА, позволяющие изучать деятельность человека в системе "летчик—ЛА—среда" во всем многообразии факторов, присущих реальному полету. Такой комплекс, предназначенный для решения инженерно-психологических задач, должен обладать:

- полнотой и точностью моделирования режимов полета, гибкой структурой математической модели, позволяющей оперативно изменять характеристики моделируемого объекта и бортовых систем;
- информационным и динамическим подобием информационно-управляющих систем реальным с возможностью варьирования составом, содержанием и формой информации;

- надежной и гибкой системой управления экспериментом, позволяющей изменять условия его проведения и методику исследований;
- развитой системой регистрации, сбора и автоматизированной обработки полетной и психофизиологической информации, позволяющей использовать различные методы оценки.

Такие динамические моделирующие комплексы ЛА дают возможность осуществлять анализ эффективности альтернативных режимов управления, исследование влияния факторов полета на систему и операторскую деятельность летчиков, обучение летчиков, отработку нештатных ситуаций, анализ работоспособности и уровня подготовки летчиков, оптимизацию параметров систем, входящих в состав эргатического информационно-управляющего комплекса ЛА.

Итак, динамические моделирующие комплексы, по существу, обеспечивают моделирование не только объектов исследования, но и психологических аспектов взаимодействия человека с управляемым объектом. Создание их сопряжено со значительными объемами работ и большими финансовыми затратами, которые, тем не менее, существенно ниже затрат в случае выявления серьезных проблем на этапе летных испытаний.

Современные подходы к созданию перспективных авиационных комплексов в ограниченные сроки и при ограниченном финансировании отмечаются значительным увеличением поисково-исследовательских и отработочных работ на ранних этапах их разработки и создания. В соответствии с этим становится весьма актуальной работа по созданию действующего макета кабины перспективного самолета, позволяющего на ранней стадии его разработки сформировать ИУП кабины, отработать логику взаимодействия летчика с бортовым оборудованием, подготовить летный состав к натурным испытаниям в интересах повышения эффективности эргономических исследований информационно-управляющего комплекса, сокращения объема натурных испытаний и повышения уровня зачетности натурных экспериментов.

Концептуальный облик и структурная схема построения действующего макета кабины

Специфика построения высокоинтеллектуальных перспективных авиационных комплексов требует реализации новых подходов к построению ИУП кабины и логики работы экипажа с комплексом бортового оборудования и авиационными средствами поражения (АСП) через ИУП. Для этого требуется выполнение значительного объема поисковых и отработочных работ по оценке вариантов построе-

ния ИУП и логики на ранних стадиях разработки АК в обстановке, наиболее приближенной к условиям эксплуатации.

Для осуществления указанных работ используются технологии виртуального прототипирования. При разработке объекта Т-50 реализация указанных технологий осуществлена на действующем макете кабины (ДМК Т-50), который был спроектирован в соответствии с техническим заданием на ОКР "Разработка макета кабины объекта Т-50" и предназначен для:

- предъявления Заказчику концепции рабочего места экипажа и ИУП;
- эргономических исследований, включающих оценку размещения экипажа, органов управления самолетом и оборудованием (рычага управления самолетом (РУС), рычага управления двигателем (РУД), индикаторов, пультов, приборов, сигнализаторов и т. д.), досягаемости органов управления самолетом и оборудованием, их необходимости и достаточности и т. д.;
- отработки принципов построения ИУП кабины;
- отработки принципов взаимодействия экипажа с бортовым оборудованием самолета.

Для обеспечения работ по оперативному формированию и отработке ИУП кабины и логики взаимодействия экипажа с ИУП разработан и изготовлен диалоговый комплекс поискового моделирования, включающий персональные ЭВМ, объединенные в локальную вычислительную сеть, программно-аппаратные средства, имитаторы органов управления ЛА, модели, имитирующие полет самолета, работу силовой установки, систем управления, бортового радиоэлектронного и специального оборудования ЛА.

Диалоговый комплекс поискового моделирования используется для обеспечения работ по формированию и предварительной отработке ИУП на режимах общего самолетовождения и боевого применения перспективных изделий.

Макет кабины предназначен для:

- эргономической оценки кабины пилота;
- оценки интерьера кабины пилота;
- оценки обзора внекабинного и внутрикабинного пространства;
- формирования и оперативной корректировки индикационных форматов;
- формирования и оперативной корректировки элементов органов управления;
- реализации логики взаимодействия экипажа с ИУП с использованием органов управления, расположенных на РУД, РУС и экранах мониторов;

- имитации режимов общего самолетовождения и боевого применения;
- эргономического сопровождения жизненного цикла перспективных маневренных самолетов. В состав макета кабины входят:

- ✓ модуль кабины, включающий
 - головную часть фюзеляжа с кабиной пилота;
 - макет радиопрозрачного конуса головной части фюзеляжа;
 - макет головки приемника топлива с элементами крепления к головной части фюзеляжа;
 - козырек фонаря кабины;
- ✓ система визуализации внешней обстановки (СВВО);
- ✓ имитатор шумов;
- ✓ вычислительная управляющая система;
- ✓ рабочее место инструктора (РМИ).

В кабине установлено и задействовано следующее оборудование:

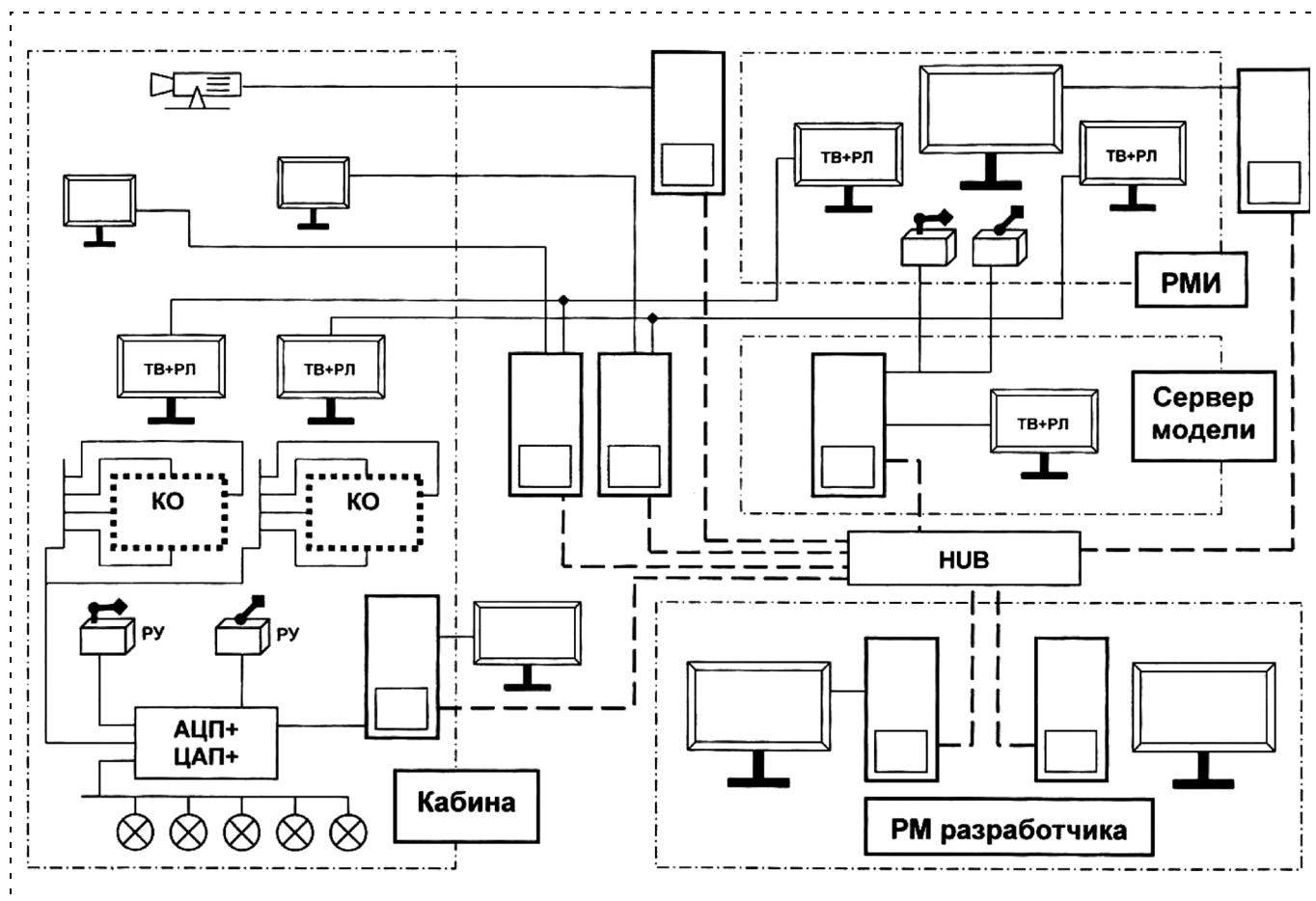
- имитаторы МФИ, ШКАИ, МФПИ, ПВИ, ИСРП*;
- РУС с обеспечением кинематики ее отклонения, оборудованная датчиками перемещения;
- РУД с обеспечением хода рычагов, оборудованные датчиками перемещения;
- педали, оборудованные датчиками перемещения;
- макетный образец катапультного кресла с регулировкой по росту;
- оперативные органы на РУС и РУД;
- органы управления на пультах кабины.

Структурная схема программно-аппаратных средств ДМК (см. рисунок) характеризуется наличием мощной вычислительной системы, объединяющей в себе комплекс вычислительных средств с развитым периферийным оборудованием, систему визуализации, рабочее место инженера-исследователя и большое число органов управления, расположенных на обрамлениях индикаторов и органах управления самолетом (РУС и РУД).

На рисунке приведена структурная схема программно-аппаратных средств ДМК Т-50. Согласно схеме, можно выделить основные компоненты ДМК:

- ✓ комплекс математических моделей, обеспечивающий моделирование двух полноразмерных и любое число упрощенных ЛА в общем пространстве;
- ✓ рабочее место пилота с имитаторами устройств индикации и органов управления;
- ✓ РМИ;
- ✓ СВВО.

* МФИ — многофункциональный индикатор; ШКАИ — широкоугольный коллиматорный авиационный индикатор; МФПИ — многофункциональный пилотажный индикатор; ПВИ — пульт ввода и индикации; ИСРП — индикатор.



Структурная схема программно-аппаратных средств ДМК Т-50: ТВ + РЛ — монитор, на котором формируется телевизионная и радиолокационная информация; КО — кнопочное обрамление; РУ — ручки управления

Основной особенностью построения вычислительной среды ДМК является использование распределенных вычислений с синхронизацией работы по центральному узлу.

Центральным узлом в сети является комплекс математических моделей, работающий на компьютере-сервере и решающий следующие задачи:

- ✓ моделирование процессов и систем на борту ЛА;
- ✓ прием и обработка сигналов, поступающих от органов управления кабины;
- ✓ формирование данных для индикации в кабине;
- ✓ формирование данных для СВВО;
- ✓ прием и обработка сигналов, поступающих от органов управления РМИ;
- ✓ формирование данных для индикации РМИ;
- ✓ моделирование внешнего мира для кабины и РМИ, а также объектов внешней обстановки;
- ✓ отправка сформированных данных в вычислительную сеть ДМК с заданной частотой.

Остальные компоненты ДМК построены на базе общего универсального программного обеспечения с подключением специфических для каждого компонента модулей.

Рабочее место пилота обслуживается двумя компьютерами, обеспечивающими индикацию на обоих МФИ, МФПИ и ПВИ, и компьютером обработки сигналов, поступающих от органов управления кабины. Программное обеспечение индикации спроектировано в виде универсальной программы, работающей в различных режимах (МФИ-Л, МФИ-П).

РМИ также обеспечено двумя компьютерами. На одном из них работает программное обеспечение индикации ИУП, на втором компьютере осуществляется управление экспериментом, отображается общая тактическая обстановка, работает система оценки загруженности летчика, система регистрации эксперимента.

Индикация ИУП может выдаваться в двух режимах: мониторинг ИУП кабины для анализа действий летчика и мониторинг ИУП РМИ для управления вторым полноразмерным ЛА, взаимодействующим (или противодействующим) данному ЛА.

Система визуализации построена по принципу "один компьютер — один проектор" и управляется тем же программным обеспечением, что и экраны кабины и РМИ.

Необходимо подчеркнуть следующие ключевые особенности программного комплекса ДМК. Основной канал передачи данных индикации ДМК реализован на основе однонаправленной широко-вещательной рассылки.

Такой подход имеет следующие преимущества:

- работа каждого узла сети не зависит от наличия и работы остальных узлов;
- произвольный порядок включения и выключения компьютеров;
- возможность работы в неполном составе компьютеров;
- высокое быстродействие протокола передачи данных позволяет обеспечить канал с высокой пропускной способностью;
- относительно простая программная реализация снижает издержки при разработке и сопровождении программного обеспечения.

Состав программного обеспечения ДМК характеризуется высокой модульностью. Разработано большое число универсальных программных модулей общего назначения, которые используются во всех компонентах вычислительной среды.

Архитектура вычислительной сети ДМК характеризуется высокой масштабируемостью. С одной стороны, возможно произвольное увеличение числа однотипных узлов в сети, например, переход к трех-, шести-, девятипроекторным системам визуализации с использованием программ, работающих в базовой однопроекторной реализации. Возможно выделение отдельного компьютера для отображения имитации индикации на ШКАИ. Возможно увеличение числа экранов в кабине. С другой стороны, без доработки существующего программного обеспечения можно разработать новое и включить его в вычислительную сеть ДМК без дополнительных издержек.

За счет высокой масштабируемости, начиная с ранних стадий разработки, ДМК находился в работоспособном состоянии и использовался для решения задач, для которых он создавался. На более поздних стадиях возможно поэтапное углубление достоверности моделирования систем, расширение состава рабочих мест и функциональности ДМК, модернизация отдельных компонентов без нарушения общей работоспособности ДМК.

В программном обеспечении ДМК основной акцент сделан на формализации всех составляющих моделируемой логики ИУП, а на основе этой формализации разделены алгоритмы логики, реализованные в программах, и конкретные правила, записанные в виде исходных данных. В результате примененного подхода возможно оперативное ре-

дактирование и настройка моделируемой на стенде логики ИУП, состава индикации и т. д.

Для имитации МФИ и МФПИ использованы 15-дюймовые жидкокристаллические мониторы от персональных компьютеров и 7,2-дюймовый жидкокристаллический монитор в промышленном исполнении. Плюсами такого технического решения является возможность передачи данных по компьютерной сети. Размеры мониторов подобраны таким образом, что они максимально совпадают с размерами реальных индикаторов, которые могут устанавливаться в кабине.

Сигналы от нажатия кнопок на кнопочном обрамлении МФИ и МФПИ поступают через фидер на плату разовых команд в интерфейсном компьютере, расположенном из конструктивных соображений в закабинном отсеке макета. Кроме сигналов с кнопочного обрамления индикаторов в интерфейсный компьютер поступают сигналы от других органов управления.

ШКАИ выполнен следующим образом. В кабине расположен габаритный макет ШКАИ, выполненный в соответствии с чертежами. Изображение, которое должно индицироваться на нем, формируется с помощью проектора на проекционном экране системы визуализации. Такое техническое решение наиболее часто применяется на стендах в силу относительной простоты реализации.

СВВО ДМК состоит из проекционного экрана и аппаратно-программных средств. Проектор установлен над кабиной. Изображение, формируемое на экране, представляется в реальном масштабе времени. СВВО обеспечивает индикацию типовых графических объектов (леса, горы, степи, моря, реки, озера). На местности формируется изображение различных объектов, таких как аэродромы с инфраструктурой, города, поселки, мосты, дороги, подвижные воздушные и морские объекты, а также различные эффекты. СВВО позволяет имитировать различные метеоусловия и время суток.

Таким образом, действующий макет кабины является мощным инструментом для поисковых исследований и последующей отработки различных технических решений по кабине самолета. Это касается, во-первых, компоновки рабочего места экипажа, конструктивного исполнения кабины и решения задач по размещению элементов управления самолетом и его системами. Во-вторых, архитектура макета, наличие современной вычислительной системы и системы визуализации внешней обстановки дают возможность разработать и провести исследования по логике взаимодействия летчика с ИУП кабины. Сопряжение макета с диалоговым комплексом поискового моделирования

позволяет разрабатывать индикационные кадры и проводить их отработку в минимальные сроки.

Действующий макет кабины представляет собой органичное соединение конструкторско-технологических и интеллектуально-математических решений, реализованных в едином комплексе. При конструктивной доработке макета удастся на ранней стадии проектирования выявить возможные ошибки и просчеты, связанные с компоновкой рабочего места экипажа.

Разработанное программное обеспечение, реализующее решение задач боевого применения (БП) и управление системами комплекса бортового оборудования и авиационных средств поражения, по степени подробности и уровню отработанности может служить базисом для разработки ПО для бортовой ЦВМ ИУС, что позволит при создании реального бортового оборудования свести к минимуму проблемы по его реализации.

На действующем макете кабины проведена отработка элементов логики взаимодействия летчика с ИУП кабины с привлечением летного состава и специалистов смежных предприятий и организаций. В результате полученных замечаний и предложений в логику были внесены изменения, направленные на обеспечение возможности выполнения задач БП. Логическим развитием действующего макета кабины является его расширение до комплекса стендов с двумя кабинами и двумя рабочими местами инструктора. Это позволяет проводить моделирование задач, которые до сих пор решить на стендах не представлялось возможным, — задач по работе с активно и разумно противодействующим противником.

Модели человека-оператора в контуре эргатической системы управления ЛА (особенности деятельности оператора в эргатической системе управления)

Разработка эргатических систем требует создания адекватной модели, формализующей поведение человека-оператора в терминах теории автоматического управления. Моделирование, осуществляемое для целей проектирования эргатических систем, должно обеспечивать учет человеческого фактора, возможностей и ограничений, присущих человеку. При автоматическом моделировании процессов управления используются модели человека-оператора. Модель должна предсказывать поведение эргатической системы в широком диапазоне условий, в частности, состояние выхода (перемещение штурвала) в зависимости от входов в каждый момент времени.

Исследования показали, что человеку свойственна не только высокая способность к адаптации, но

и зависимость характеристик от уровня тренированности, загрузки дополнительной работой и т. д. У опытного летчика управляющие движения более экономны, амплитуда, с которой он перемещает ручку управления, в 1,5...2 раза меньше, чем у оператора, прошедшего курс тренировок [5].

Одним из первых и наиболее распространенных методов моделирования оператора в процессе слежения является описание человека непрерывной передаточной функцией с постоянными коэффициентами, выход которой суммируется с ремнантой — частью выходного сигнала, которая обычно принимается как шум. Модель должна отражать присущие человеку факторы: временную задержку реакции — период невосприимчивости, который равен приблизительно $\tau_{\text{л}} = 0,1...0,25$ с, и динамическое нервно-мышечное запаздывание $(\tau_{\text{м}}s + 1)^{-1}$, постоянная времени которого лежит в диапазоне $\tau_{\text{м}} = 0,1...0,2$ с.

Передаточные функции человека-оператора идентифицировали [5] по результатам исследования системы с компенсирующим слежением, в которой индифицировался только один сигнал — ошибка $\delta = r_{\delta} - z_{\delta}$ между задаваемым на вход системы случайным входом $r_{\delta}(t)$ и действительной реакцией системы $z_{\delta}(t)$, а объекты управления $H_0(s)$ варьировались:

$$z_{\delta} = H_0(s)u_{\text{л}}; u_{\text{л}} = W_{\text{л}}(s)\delta + v_{\text{л}}.$$

Выявлено, что в процессе директорного управления оператор обладает значительной инвариантностью к изменению коэффициента усиления объекта: при изменении этого коэффициента в 30 раз качество регулирования почти не менялось, что можно объяснить только адаптацией к свойствам объекта. Однако при очень высокой чувствительности управляющего органа ошибка регулирования значительно возрастает, что обусловлено дополнительными помехами $v_{\text{л}}$, вызванными движениями рук человека. Наиболее распространенная модель человека может быть записана в виде последовательного соединения неизменяемой части $W'_{\text{л}}(s)$ и варьруемой $W''_{\text{л}}(s)$:

$$W_{\text{л}}(s) = W'_{\text{л}}(s) W''_{\text{л}}(s),$$

где $W'_{\text{л}} = e^{-s\tau_{\text{л}}}/(\tau_{\text{м}}s + 1)$.

Иногда влияние чистого и динамического запаздывания объединяют, увеличивая величину $\tau_{\text{л}}$ до 0,25...0,3 с. Изменяемый оператор обычно задается в виде

$$W''_{\text{л}}(s) = K_{\text{л}}(T_{1\text{л}}s + 1)/(T_{2\text{л}}s + 1).$$

Применительно к задаче управления ЛА структуру передаточной функции следует уточнить, имея в виду интегрирующее действие летчика. Благодаря адаптивным свойствам человека коэффициент усиления по интегральной составляющей $K_{л.и}$ меняется таким образом, чтобы не ухудшалось качество системы. Эти соображения приводят к следующей изменяемой части передаточной функции летчика:

$$W_{л}''(s) = K_{л}(T_{1л}s + 1)/(T_{2л}s + 1) + K_{л.и}/(s + v_{л}),$$

$$v_{л} < 1 \text{ (с}^{-1}\text{)},$$

причем подключение "интегрального" члена летчик реализует, например, включением механизма триммерного эффекта. Следовательно, в задаче управления ЛА действия летчика характеризуются динамическим запаздыванием $T_{2л}$ и форсированием $T_{1л}$. Литературные данные свидетельствуют о том, что запаздывание преобладает над форсированием $T_{2л} \approx (10...20)T_{1л}$. Экспериментальные исследования показывают, что введение форсирования достигается определенной ценой — увеличением сложности (для оператора) решения поставленной задачи управления. Передаточная функция летчика зависит также от типа предъявляемой ему информации.

Модель оператора при управлении по отклонению и входной переменной r_{δ} имеет вид

$$u_{л}(s) = W_{л}(s)\delta(s) + W_{r}(s)r_{\delta}(s) + v_{л}(s).$$

Человек-оператор в системе с сопровождающим слежением реализует комбинированный принцип управления — по входу и рассогласованию. При сопровождающем слежении хорошо тренированный оператор осуществляет движение на основе зрительного восприятия изменений входного сигнала, а информация об ошибке слежения служит для контроля и выработки корректирующих действий.

В системе слежения с предвидением задающего сигнала летчику задается дополнительная информация о поведении задающего сигнала на отрезке времени $\tau = [0, \tau_y]$ от настоящего момента t до некоторого момента $t + \tau_y$, в будущем. Летчик может оптимизировать приближение текущего значения выхода к прогнозируемому.

Кроме того, в системах слежения с прогнозированием задающего сигнала и выходной величины индицируется выход $z(t + \tau)$ на некоторый упреждающий интервал времени. Для реализации ото-

бражений сигналов $r_{\delta}(t + \tau)$ и $z_{\delta}(t + \tau)$ в систему вводится модель с ускоренным временем. Время реакции оператора, обрабатывающего ступенчатый входной сигнал с помощью усилительного звена, составляет $\tau = 0,24$ с, $\sigma_{\tau} = 0,07$ с. Оптимальным коэффициентом усиления этого звена является величина $4 \cdot 10^{-3}$ рад/мм. Математическое ожидание переходного процесса динамической модели человека-оператора, включенной последовательно с интегрирующим звеном, соответствует переходному процессу инерционного звена. Коэффициент усиления и постоянная времени передаточной функции оператора зависят от коэффициента интегрирующего звена. Оптимальный коэффициент усиления интегрирующего звена находится в диапазоне $(4...8) \cdot 10^{-3}$ рад/с · мм.

Собственный коэффициент усиления для тренированного человека-оператора, обрабатывающего ступенчатый сигнал с помощью усилительного или интегрирующего звена, устанавливается таким, чтобы общий коэффициент разомкнутой системы находился в диапазоне 3...5 рад/с. При отслеживании процесса с помощью системы, содержащей два интегрирующих звена, человек реагирует и на производную от ошибки слежения, т. е. модель человека-оператора содержит упреждающий член.

Список литературы

1. Сильвестров М. М., Бегичев Ю. И., Варочко А. Г., Чернышев В. А. и др. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов // Под ред. М. М. Сильвестрова. М.: Филиал Воениздата, 2007. 510 с.
2. Чернышев В. А., Сильвестров М. М. Методология создания и концепция построения эргатического интегрированного комплекса управления многофункционального маневренного самолета / Под ред. М. М. Сильвестрова. Тверь: Триада, 2009. 216 с.
3. Сильвестров М. М., Чернышев В. А., Луканичев В. Ю. Разработка принципов эргономического исследования и отработки на диалоговом моделирующем комплексе информационно-управляющей системы маневренных самолетов // Проблемы психологии и эргономики. Журнал "Человеческий фактор в авиации и космонавтике". Спец. вып. 1/1 (38). 2007. С. 39—46.
4. Левин Д. Н., Шапиро М. Г. Опыт использования пилотажного стенда в интересах отработки информационно-управляющего поля кабины перспективного истребителя // Вторая науч.-техн. конф. "Тренажерные технологии и обучение: новые подходы и задачи". г. Жуковский, 2003.
5. Сильвестров М. М., Козиоров Л. М., Пономаренко В. А. Автоматизация управления летательными аппаратами с учетом человеческого фактора. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.

В. Ф. Грибков,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

ГосНИИАС, Москва,

Н. И. Корнеев, аспирант,**Е. В. Шестопапов,** аспирант,

Московский авиационный институт

(государственный технический университет)

nkorneev@gmail.com

Математическая модель бортовой радиолокационной станции для базы знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы

Изложены структура и состав математической модели бортовой радиолокационной станции (БРЛС). Рассматриваемая модель БРЛС предназначена для применения в базе знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы (БОСЭС) типовой боевой ситуации "Ввод группы в бой". Набор функциональных требований, предъявляемых к модели со стороны БОСЭС, позволил более четко ограничить ее структуру и реализовать модель БРЛС программно. Разработанная система позволяет решать задачи по оценке выхода моделируемых целей за пределы зоны наблюдения и входа в "слепой" ракурс. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: бортовой интеллект, зона наблюдения, прогнозирование поведения, экспертная система, радиолокационная станция, радиоэлектронное оборудование.

Развитие авиационных технологий направлено не только по пути улучшения компоновки, аэродинамики, средств вооружения и обороны самолета. Улучшения только этих характеристик сейчас недостаточно для желаемого повышения эффективности боевого применения и повышения выживаемости. Бурное развитие информационных технологий позволило инженерам направить свои усилия на совершенствование интеллектуальной составляющей "ядра" бортового комплекса — совокупности алгоритмов бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) и алгоритмов деятельности экипажа, которая сейчас называется "бортовым интеллектом". Бортовой интеллект состоит из набора разрозненных систем и создает функционально целостный комплекс, нацеленный на выполнение задач боевого вылета самолета.

На современном боевом самолете алгоритмическим обеспечением БЦВМ решаются многочисленные задачи, такие как обработка информации, применение средств вооружения. Задачи оператив-

ного назначения текущей цели полета и выбора наиболее рационального способа достижения этой цели решаются только экипажем.

Результаты проведенных исследований, совершенствование бортовых вычислительных, измерительных и исполнительных устройств боевых самолетов дают возможность разработать и реализовать на их борту алгоритмы и системы нового типа, способные обеспечивать решение упомянутых тактических задач путем оперативных подсказок экипажу.

Для решения такого класса задач имеется научно-технический задел — новая структура алгоритмов "ядра" в виде бортовых оперативно-советующих экспертных систем (БОСЭС) типовых ситуаций функционирования.

Для полноценного функционирования БОСЭС необходимо наличие виртуальной внешней обстановки и упрощенных моделей основных элементов бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО). Все это требуется для математического моделирования на борту самолета различных вариантов воздушного боя. Основной целью такого моделирования является выбор наилучшей тактики ведения воздушного боя в быстро изменяющейся обстановке. В определенной степени существует сходство с наземным полунатурным моделированием, где интегрируются реальные элементы БРЭО с имитаторами внешней обстановки и математическими моделями.

Математические модели (ММ) некоторых бортовых измерительных устройств разрабатывались ранее для использования в базе знаний БОСЭС [1, 2], но сложность создания адекватной ММ бортовой радиолокационной станции (БРЛС) длительное время не позволяла реализовать ее программно. Основной проблемой реализации является огромное число факторов (параметров внешне- и внутрибортовой обстановки), которые необходимо учитывать при построении архитектуры и алгоритма ММ. К тому же для последующего моделирования необходимы существенные вычислительные затраты, значительно превышающие требования выполнения моделирования в реальном или близком к нему времени.

При рациональной постановке задачи и детальном анализе поставленных требований было принято решение о создании для базы знаний БОСЭС математической модели БРЛС, приближенной к аппаратурному аналогу. Поэтому в данной статье рассмотрена упрощенная модель станции, расчеты в которой ограничены функциональными требованиями со стороны БОСЭС.

Функциональное назначение БРЛС

Ранее в зарубежной печати уже сообщалось о разработках и создании наземных и бортовых моделирующих комплексов, схожих по своим функциональным возможностям с ММ БРЛС. Данные комплексы позиционируются как системы для обучения летчиков на тренажерах и поддержки проведения тренинга в летных условиях при боевых учениях, а также непосредственно перед вступлением в реальный воздушный бой [3–5]. В качестве примера можно привести моделирующую систему АСМІ, которая размещается в подвесном контейнере и использует информацию от своих и самолетных датчиков.

В базе знаний БОСЭС во время полета боевого самолета реализуется в близком к реальному времени математическое моделирование ситуаций воздушного боя с использованием необходимой информации от БРЭО, базы данных (БД) и базы знаний (БЗ), занесенных в БОСЭС. На рис. 1 изображены основные информационные связи между перечисленными элементами и обозначено место математической модели БРЛС в рамках общего комплекса систем. Таким образом, ММ БРЛС, находясь в БЗ, обрабатывает алгоритмическую часть БОСЭС, в которую также поступает и текущая информация от БРЭО.

Такая модель БРЛС может быть использована как в наземных комплексах полунатурного моделирования (КПМ), так и при работе БОСЭС в бое-

вых условиях. При проведении исследований или отработке тактик поведения в воздушном бою, на КПМ вместо БРЭО, обозначенном на рис. 1, подключаются его имитаторы и блоки моделируемых целей.

БРЛС структурно входит в состав БОСЭС, расширяя своим функционалом базу знаний и набор математических моделей экспертной системы. Важным условием для функционирования БРЛС является постоянный обмен информацией (разовыми сигналами) с другими системами комплекса.

Разработанная математическая модель предназначена для имитации пространственно-временных функций БРЛС при выполнении ускоренного бортового моделирования в БЗ БОСЭС, с проигрыванием на периодически повторяющихся интервалах времени типовых боевых ситуаций и возможных вариантов их развития [4]. Результат моделирования — прогноз развития боевой ситуации, который должен использоваться для выбора наилучшего тактического приема и целераспределения в условиях ведения воздушного боя группой истребителей.

Упрощенная ММ БРЛС должна обладать следующими свойствами:

- осуществление вычислений в соответствии с требованиями со стороны алгоритмов БОСЭС;
- наличие простотой алгоритмической реализации для рационального использования времени, отведенного бортовым вычислителем для математического моделирования.

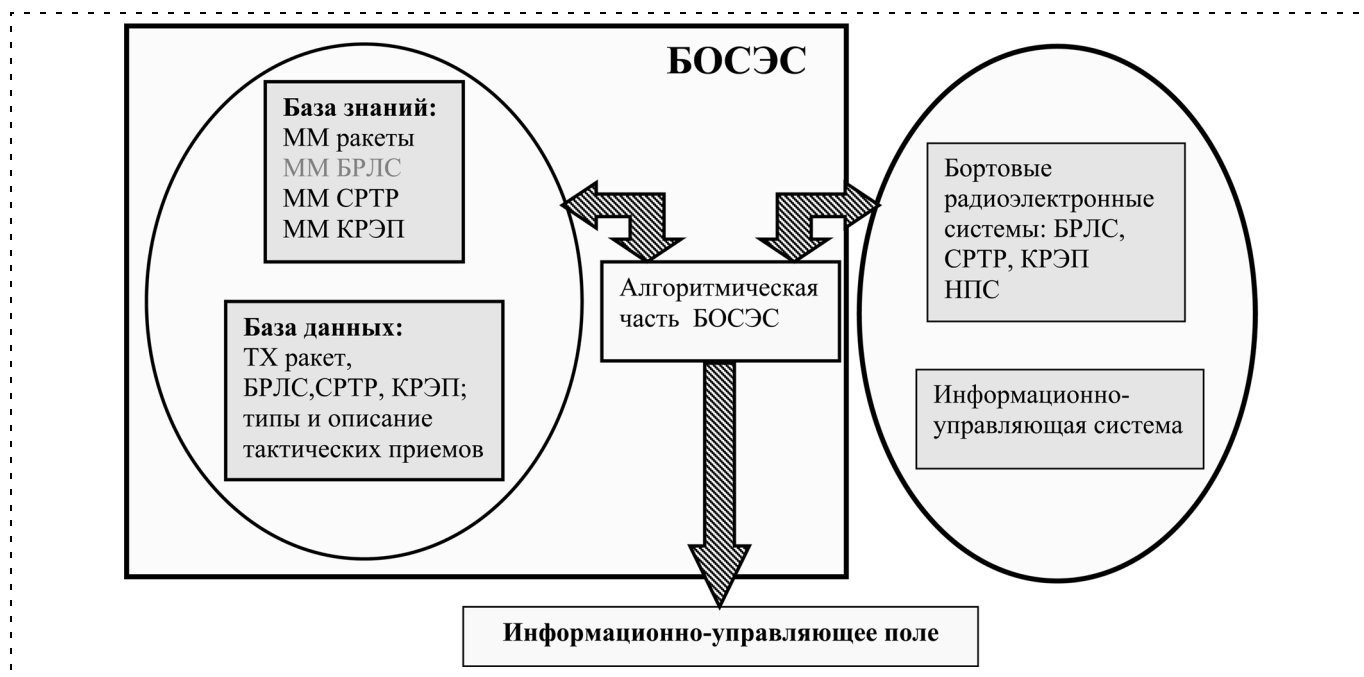


Рис. 1. Информационные связи элементов КПМ (ММ — математическая модель; ММ ракеты — математическая модель алгоритма наведения ракеты; СРТР — станция радиотехнической разведки; КРЭП — комплекс радиоэлектронного противодействия; ТХ — технические характеристики; НПС — навигационно-пилотажная система)

Описание алгоритма ММ БРЛС

При проведении работ на КПП в ММ БРЛС осуществляется пространственная селекция моделируемых целей с учетом времени их пребывания в зоне так называемых "слепых" ракурсов. Модель выбора целей основана на энергетическом признаке — превышении мощностью сигнала заданного уровня порога. Координаты и скорости выбранных целей передаются в блок ситуационного управления (БСУ) — один из функциональных модулей БОСЭС.

Ввиду того, что назначением программного модуля БРЛС является обслуживание задач, решаемых при отработке БСУ, в качестве основных принципов при создании ММ БРЛС для БЗ БОСЭС были положены следующие:

- всеракурсное воспроизведение отражающих способностей воздушной цели на основе эллипсоидной модели изменения ее эффективной площади рассеивания;
- имитация пространственной зоны наблюдения, определяемой горизонтальными и вертикальными углами обзора БРЛС;
- ограничения наблюдаемости воздушных целей в результате выхода их на "слепые" ракурсы;
- вычисление энергетического соотношения сигнал/шум для каждой цели, в зависимости от значения которого цель наблюдается в одном из режимов работы БРЛС:
 - цель не обнаружена;
 - цель обнаружена в зоне обзора;
 - цель сопровождается в режиме непрерывной пеленгации.

Указанные функции, выполняемые ММ БРЛС, позволяют прогнозировать поведение группы целей противника на сравнительно коротком интервале времени (в пределах нескольких секунд) при учете положений целей и их скоростей, получаемых на основе измерений от реальной БРЛС. Разработанная ММ БРЛС может быть использована как для имитации БРЛС противника, наблюдающей нашу группу самолетов, так и для моделирования нашей БРЛС, осуществляющей обзор пространства с самолетами противника. Такое моделирование может проводиться одновременно для предсказания действий противника, для наилучшего целераспределения и выбора тактического приема.

ММ БРЛС разработана как программа, встроенная в программный комплекс с общим диспетчером. В программе реализованы два основных режима работы БРЛС: "Обзор" и "Режим непрерывной пеленгации", а основными выполняемыми функциями являются:

- пространственная селекция целей — анализ каждой цели на предмет расположения в зоне на-

блюдения БРЛС, в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

- проверка нахождения цели в "слепом" ракурсе, который соответствует малым скоростям целей (порядка 20...30 м/с) при ракурсном сближении или при наблюдении наземных целей;
- оценка мощности сигнала, отраженного от цели, по отношению к уровню собственных шумов БРЛС (вычисление соотношения сигнал/шум — Q) для установления факта превышения заданного порога обнаружения или сопровождения.

На вход ММ БРЛС поступает информация о координатах и скоростях самолетов, определяющих моделируемую в КПП или реальную (по информации от БРЭО) внешнюю обстановку. Выходом ММ БРЛС являются характеристики наблюдаемых целей, прошедших пространственно-временную и энергетическую селекцию:

- координаты и скорости целей;
- дальности до БРЛС;
- результаты проверки на вхождение цели в зону наблюдения и времени пребывания в этой зоне;
- результаты проверки на попадание цели в "слепой" ракурс и времени нахождения в нем;
- признаки обнаружения и сопровождения целей.

Общий алгоритм функционирования ММ БРЛС представлен на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

Программный модуль интегрируется с Базой знаний, обладающей собственным Диспетчером. Задача Диспетчера — определение такта счета (0,1 с) и прием результатов вычислений с последующей передачей их в БОСЭС. В алгоритме рассматриваются два режима работы БРЛС — "Обзор" и "Режим непрерывной пеленгации (РНП)". Для БОСЭС, функционирующей в режиме "Ввод группы в бой", от ММ БРЛС в моделируемую внешнюю обстановку важно сообщить эволюцию перемещения групп самолетов противника, их положение относительно зоны наблюдения в реальной БРЛС и прогноз последующего движения с возможным выходом из нее или входом в "слепой" ракурс. В разработанном алгоритме на основе указанных перемещений целей, модели которых формируются по информации, поступающей от реальной БРЛС, проводится селекция в "Цикле по целям" с последующим учетом их движения в пространстве.

Программный модуль ММ БРЛС реализован в среде быстрой разработки C++ Builder. Проведена интеграция модуля с общим программным комплексом и детально описаны все необходимые протоколы сопряжения с другими модулями для постоянного обмена информацией.

Основные элементы алгоритма функционирования БРЛС

Логика алгоритма функционирования ММ БРЛС описывает последовательное выполнение программных процедур, отвечающих за проведение необходимых для получения корректного результата на каждой временной итерации расчетов. Условно алгоритм можно разделить на ключевые и вспомогательные процедуры, соединенные между собой потоками. В ключевых процедурах выполняются основные математические расчеты, осуществляющие наибольшую нагрузку на аппаратное обеспечение (блоки на рис. 2, обозначенные затемнением). В зависимости от текущей ситуации воздушного боя не всегда существует необходимость обрабатывать последовательно все процедуры. Введение в алгоритм вспомогательных процедур позволило ограничить вычисления и предоставлять результаты по требованиям конкретной ситуации. Рассмотрим более детально назначение и особенности каждой из перечисленных процедур.

Процедура загрузки начальных условий

Основное назначение процедуры — ввод в системную память технических характеристик:

1) мощности излучения БРЛС, коэффициентов усиления передающей и приемной антенн, длины волны;

2) признака принадлежности каждого i -го истребителя (сопровождение или перехват) и максимального их числа.

Процедура формирования двумерных массивов

При выполнении процедуры проводится структурирование разрозненной информации о положении истребителей в пространстве и их скоростях.

Процедура проверки попадания цели в зону обзора

Рассчитывается положение центра зоны обзора, который определяется направлением вектора скорости (предполагается, что вектор скорости направлен по строительной оси самолета), и проводится проверка попадания цели в заданные ограничения. Общая зона обзора, в пределах которой перемещается антенный луч, задается константами в горизонтальной $\varphi_{ГМ}$ (задано $\pm 60^\circ$) и в вертикальной $\varphi_{ВМ}$ (задано $\pm 10^\circ$) плоскостях.

Процедура проверки попадания цели в "слепой" ракурс

Появление "слепых" ракурсов характерно для доплеровских БРЛС (при ракурсах, приближающихся к 90°). При выполнении процедуры происходит определение (вычисление) полусферы атаки,

и на основе полученных результатов проводится проверка попадания цели в "слепой" ракурс.

Процедура вычисления Q

В процедуре проводится вычисление отношения мощности сигнала от цели к мощности внутреннего шума БРЛС. По результатам вычислений устанавливается факт превышения заданного порога обнаружения (сопровождения) цели. В зависимости от выполнения условий обнаружения и сопровождения каждой цели присваивается соответствующий индекс: "Цель не обнаружена", "Цель обнаружена, но не сопровождается", "Цель обнаружена и сопровождается".

Процедура формирования массива целей для РНП

На основе информации из исходного массива моделируемых целей происходит формирование нового массива, компонентами которого являются цели с характеристиками:

- 1) цель находится в зоне обзора;
- 2) цель в "слепом" ракурсе;
- 3) признаки обнаружения и сопровождения положительные.

На выходе также получаем номера целей, принятых на РНП.

Процедура идентификации цели в РНП

По входным данным о координатах и скоростях всех моделируемых целей в массиве, полученном в процедуре формирования массива целей, пригодных для режима непрерывной пеленгации, находятся цели, принятые на РНП, и их номера.

Процедура присвоения новых номеров целям

По выходным данным блока номеров целей, принятых на РНП, значения координат и скорости от всех моделируемых целей сравниваются со значениями текущих и вновь принятых на РНП целей, и принимается решение о смене номеров целей. На выходе формируется обновленный массив целей.

Процедура определения факта нахождения цели в луче антенны БРЛС

Для одного истребителя сопровождения и одного истребителя-перехватчика вычисляются составляющие единичного вектора дальности в момент входа цели в "слепую зону", составляющие единичного вектора дальности в момент выхода цели из "слепой" зоны, угол между двумя положениями вектора дальности, а сразу после появления признака выхода из "слепой" зоны находится угол между двумя положениями вектора дальности. Затем проверяется условие нахождения цели в диаграмме на-

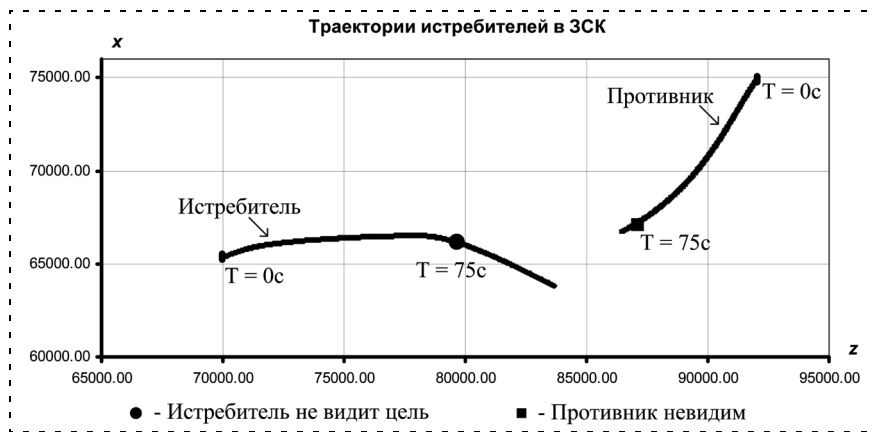


Рис. 3. Траектории движения самолетов в горизонтальной плоскости

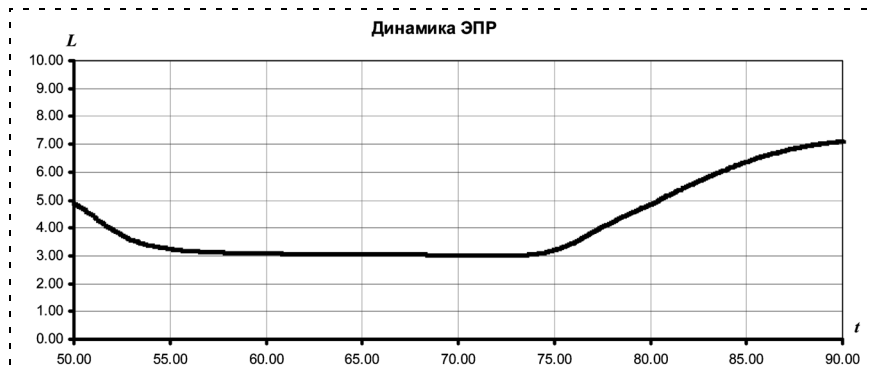


Рис. 4. Изменение эффективной площади рассеяния



Рис. 5. Траектории движения самолетов

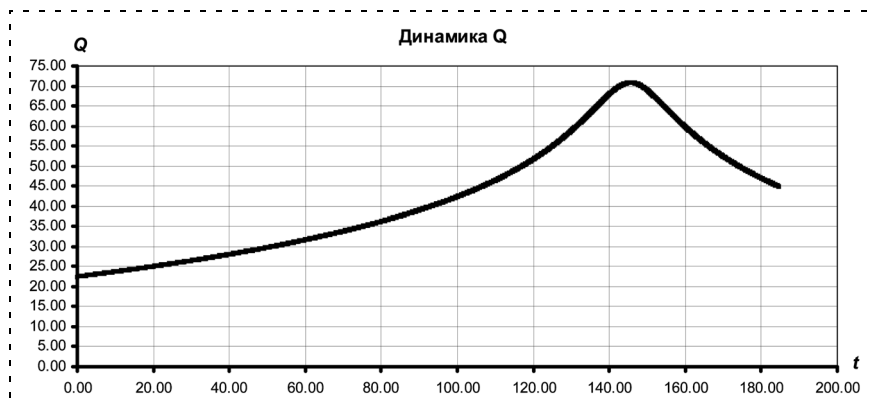


Рис. 6. Соотношение сигнал/шум

правленности антенны (ДНА), в противном случае она исключается из наблюдения.

Результаты компьютерного моделирования

Было проведено компьютерное моделирование для оценки функционирования предлагаемой модели БРЛС в двух вариантах начальных условий.

Вариант 1

Для моделирования использовали следующие начальные условия:

- истребитель-носитель БРЛС (ИН): высота полета $H = 1500$ м, скорость $V = 337$ м/с.
- истребитель-перехватчик противника (ИП): $H = 3000$ м, $V = 320$ м/с.

На рис. 3 показаны траектории движения самолетов в горизонтальной плоскости. На графике отмечено положение ИН на 75 с полета, когда БРЛС теряет ИП из-за его выхода из зоны обзора.

Изменение эффективной площади рассеяния (ЭПР) во времени истребителя-перехватчика при наблюдении его с борта истребителя ИН показано на рис. 4.

Вариант 2

Для второго моделирования использовались следующие начальные условия:

- ИН: $H = 2000$ м, $V = 166$ м/с, прямолинейный полет;
- ИП: $H = 3000$ м, $V = 413$ м/с, пересекает зону обзора истребителя, совершая прямолинейный полет.

На рис. 5 показаны траектории движения самолетов. До 14 с и после 137 с полета истребитель-перехватчик противника находится вне зоны наблюдения БРЛС, расположенной на борту ИН.

На рис. 6 демонстрируется изменение соотношения сигнал/шум при движении цели (ИП) по траектории полета, а на рис. 7 — график изменения угла визирования.

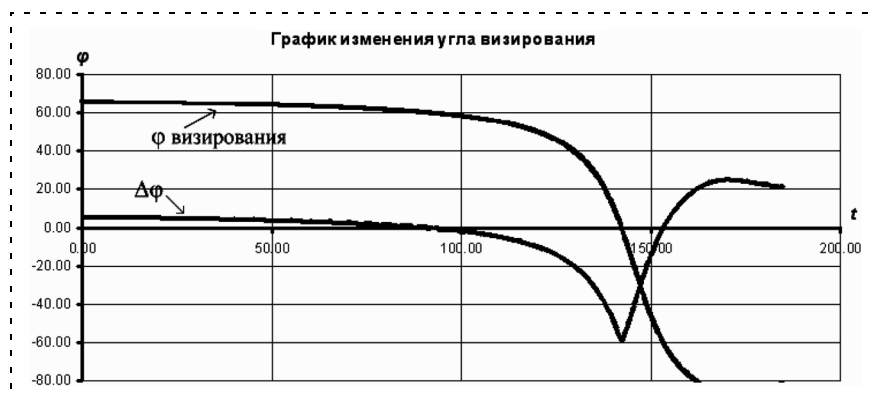


Рис. 7. Изменение угла визирования

Моделирование проводилось с интервалом итераций $\Delta T = 0,1$ с.

Заключение

Разработана математическая модель БРЛС, основанная на энергетических соотношениях и геометрических положениях летательных аппаратов в трехмерном пространстве. Логика работы БРЛС при обнаружении и сопровождении целей упроще-

на до той степени, которая требуется для корректного функционирования базы знаний БОСЭС при бортовом моделировании типовых боевых ситуаций. Проведенное компьютерное тестирование программы, составленной по алгоритму ММ БРЛС, показало работоспособность алгоритма в соответствии с предъявленными к нему требованиями.

Список литературы

1. Федун Б. Е. Проблемы разработки бортовых оперативно-советующих экспертных систем для антропоцентрических объектов // Изв. РАН. ТиСУ. 1996. № 5. С. 147—159.
2. Дёмкин М. А., Панкратов О. Н., Федун Б. Е. Аппроксимирующая математическая модель ракеты "В-В" для расчета в реальном времени характерных дальностей ее полета // Мехатроника. № 9. 2001. С. 30—36.
3. Glen L. Harris. Joint modeling simulation system (J-MASS) // IEEE NAECON'96. 1996. V. 2. P. 614—621.
4. ACMI. New application, old problems // MT&SN. Vol. 4. Issue 3. June 2003. P. 43.
5. Система полунатурного моделирования авионики (AVSIM) фирмы Нортроп Грумман // Научно-техническая информация. ГосНИИАС. 2005. № 2. С. 12.

Беспилотные многоцелевые комплексы

«UVS - TECH 2010»



3—5 марта 2010 г. в Центральном выставочном комплексе "Экспоцентр" пройдут

Четвертый Московский международный форум и выставка

"Беспилотные многоцелевые комплексы" — "UVS — TECH 2010"

Цели мероприятия — презентация проектов, демонстрация достижений предприятий-разработчиков и изготовителей, обмен опытом, обсуждение стратегии, путей развития и потребностей гражданских отраслей в выполнении работ и предоставлении услуг в области создания и использования беспилотных комплексов.

Тематика

ПРОЕКТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

- разработка и реализация проектов выполнения работ и предоставления услуг с использованием беспилотных многоцелевых комплексов

КОНСТРУКЦИИ БЕСПИЛОТНОЙ ТЕХНИКИ

- беспилотные летательные аппараты самолетного и вертолетного типов
- беспилотные воздухоплавательные комплексы
- беспилотные наземные комплексы
- беспилотные надводные и подводные комплексы
- силовые установки для беспилотных комплексов
- конструкционные материалы беспилотных комплексов
- надежность и безопасность при эксплуатации беспилотных комплексов

СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

- системы управления, ориентации, навигации, наблюдения, связи для обеспечения эксплуатации беспилотных многоцелевых комплексов

ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА

- целевое оборудование, размещаемое на беспилотных комплексах для выполнения работ и предоставления услуг в интересах гражданских отраслей, в том числе: системы обработки информации, полученной с использованием беспилотных комплексов, с выпуском продукции для удовлетворения потребностей гражданских отраслей

НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

- прогнозирование и технико-экономическая оценка использования беспилотных комплексов
- технологии выполнения работ и предоставления услуг с использованием беспилотных комплексов
- законодательная и нормативно-правовая база создания и использования беспилотных комплексов
- сертификация беспилотных комплексов
- коммерциализация использования беспилотных комплексов

Дополнительная информация о форуме и выставке:
ООО "ЭКСПО-ЭКОС"
 Тел.: +7(495) 331-2333, 332-3601; факс: +7(495) 331-0511
 Касаткина Елена: e-mail: elena@expoecos.com
 www.expoecos.com

Л. Н. Александровская,
д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,

А. Г. Кузнецов, канд. техн. наук, ген. директор,

Ю. И. Солонников, инженер,
ОАО "Московский институт
электромеханики и автоматики"
aomiea@aviapribor.ru

Особенности менеджмента качества и сертификации бортовых систем воздушных судов

Проведен анализ ряда зарубежных нормативных документов (DO-178B, DO-254, ARP4761, ARP4754), русскоязычные версии которых в настоящее время подготовлены и внедряются в практику проектирования и сертификации самолетного бортового оборудования. Показано, что внедрение современной тенденции технологии проектирования, отраженной в этих документах, приводит к пересмотру соотношения между основными этапами проектирования: математическим моделированием, стендовой отработкой и летными испытаниями в сторону переноса основного объема работ на наземную отработку и сокращения объема летных испытаний.

Ключевые слова: нормативные документы, DO-178B, DO-254, ARP4561, ARP4754, сквозная сертификация.

Современный этап развития менеджмента качества характеризуется переносом основных акцентов с контроля готовой продукции на контроль и управление процессами ее создания. Ключевыми моментами этой тенденции являются процессный и системный подходы к менеджменту качества, при которых процессы создания продукции рассматриваются во взаимосвязи, образующей систему менеджмента качества (СМК).

Данная тенденция нашла свое воплощение в серии международных стандартов ИСО 9000. Не умаляя роли этих стандартов в создании СМК предприятий авиационной промышленности, нельзя не отметить тот факт, что их универсальность не позволяет в необходимой степени отразить специфику создания авиационного оборудования, представляющего собой высокоинтегрированные сложные цифровые системы. Именно поэтому у разработчиков бортового оборудования воздушных судов сложилось в ряде случаев негативное отношение к этим стандартам как к формальным требованиям, не затрагивающим практику разработки, а используемым лишь отделами качества для формального же проведения сертификации.

Анализ зарубежного опыта менеджмента качества показал, что, во-первых, сертификация является мощным средством обеспечения качества, и, во-вторых, методы менеджмента качества только в том

случае являются эффективными, когда они применяются на всех уровнях организации — от разработчиков до высшего руководства. Поэтому целью настоящей статьи является ознакомление широкого круга специалистов в области создания аэрокосмического бортового оборудования с зарубежным опытом внедрения системного и процессного подходов в практику проектирования, а также с основными преимуществами так называемой "сквозной" сертификации при участии в ней всех специалистов, занятых в полном жизненном цикле продукции.

Сертификационный базис воздушных судов

Применительно к бортовым системам воздушных судов (ВС) процессный и системный подходы нашли свое наиболее полное воплощение в следующих документах [2—5]:

- DO-178B. Рассмотрение программного обеспечения при сертификации авиационных бортовых систем и оборудования;
- DO-254. Руководство по гарантии разработки бортовой электронной аппаратуры;
- ARP4761. Руководящие указания и методы проведения оценки безопасности бортовых систем гражданской авиации;
- ARP4754. Руководство по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации.

Руководство ARP4754 предназначено для создания единой международной базы для разработчиков, изготовителей систем, предприятий, устанавливающих системы на ВС, и сертификационных органов для оценки соответствия нормам летной годности, относящимся к высокоинтегрированным сложным системам.

При этом наиболее полное определение сложности дано в DO-254: "Элемент аппаратуры определяется как простой, только если обширная комбинация детерминированных проверок и анализов ... сможет обеспечить правильность функциональной характеристики во всех предполагаемых условиях эксплуатации без аномалий в поведении. Когда элемент не может быть классифицирован как простой, он должен быть классифицирован как сложный".

"Для простого элемента аппаратуры нет необходимости в обширной документации на процесс проектирования".

"Для сложных элементов средства обеспечения качества проектирования должны быть согласованы с сертифицирующим органом на раннем этапе жизненного цикла проектирования аппаратуры".

Заметим также, что из определений простого и сложного элементов вытекает недостаточность применения детерминированных методов анализа, что логически обуславливает необходимость использования статистических подходов.

Перечисленные документы разработаны, в первую очередь, для электронных систем, однако в ARP4761 отмечается возможность распространения изложенных в них рекомендаций и на другие системы ВС.

Документ ARP4761 был разработан по запросу FAA (Federal Aviation Administration — федеральная авиационная федерация) к SAE (Society of Automotive Engineers, Inc — общество инженеров транспорта). Была организована специальная группа по разработке требований и интеграции систем (System Integration Requirements Task Group — SIRT), целью работы которой была подготовка рекомендательного руководства (Aerospace Recommended Practice — ARP) по определению вида и объема информации на уровне систем для демонстрации соответствия нормам высокоинтегрированных и сложных систем авионики.

Для согласования требований на международном уровне для участия в работе были приглашены представители JAA (Joint Aviation Authority — Объединенная авиационная власть стран Западной Европы).

В группу SIRT вошли специалисты, имеющие большой опыт проектирования и поддержки эксплуатации магистральных гражданских самолетов, самолетов местных воздушных линий, самолетов авиации общего назначения, бортового электронного оборудования, двигателей и систем управления, а также представители сертификационных органов. Были установлены связи со специальными комитетами SC-167 и SC-180 RTCA (Радиотехническая комиссия по авионавигации) и S-18 SAE.

Во время разработки данного документа неоднократно возникала дискуссия по поводу его детализации. С одной стороны, в руководящем материале необходимо было сконцентрировать внимание на фундаментальных принципах сертификации, а определение деталей, касающихся конкретных систем, предоставить заявителям и сертифицирующему органу. С другой стороны, было бы полезно включение в документ перечня шагов, выполняемых при сертификации. В результате документ представляет собой некоторый компромисс между указанными мнениями с акцентом на первое.

Поскольку назначением данного документа являлось создание единой основы для сертификации, то руководство направлено, в основном, на обеспечение требований к безопасности, однако может быть полезно и для оценки соот-

ветствия другим требованиям, определяющим удовлетворительное функционирование систем.

Ключевым моментом, обеспечивающим гарантию проектирования, является системный подход к проектированию бортовой аппаратуры ВС. Под **гарантией проектирования** понимается процесс, состоящий из специально запланированных систематических мероприятий, обеспечивающих в совокупности уверенность в том, что ошибки или упущения в требованиях или проекте выявлены и устранены таким образом, что реализованная система будет удовлетворять сертификационным требованиям.

Модель процесса реализации функций ВС

На рис. 1 представлена модель процесса реализации функций ВС.

Каждая из самолетных функций не обязательно связана с единой физически реализованной системой.

Модель охватывает многочисленные процессы системного проектирования.

Процесс проектирования каждой системы может включать ряд процессов разработки составляющих ее компонентов, при этом процесс разработки каждого из них может содержать ряд жизненных циклов разработки. На рис. 2 показан типовой процесс проектирования системы.

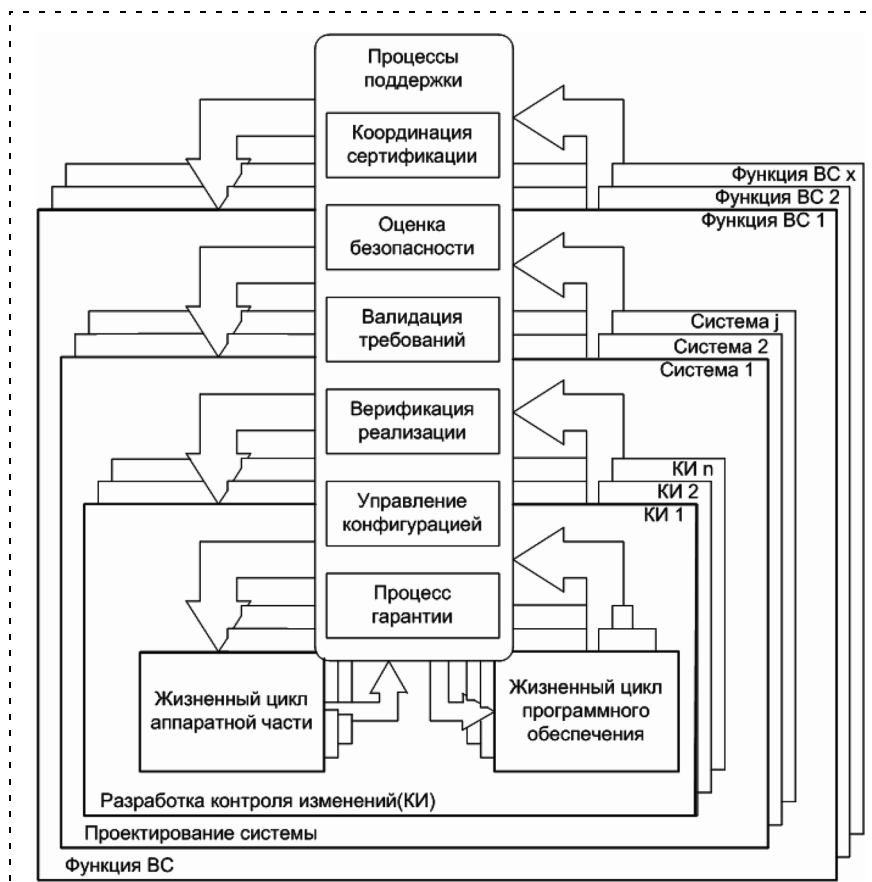


Рис. 1. Процесс реализации функций воздушного судна

Типовой подход к проектированию функциональных систем ВС начинается с концептуального проектирования и заканчивается сертификацией. Обычной концептуальной моделью процесса проектирования системы является последовательность выполняемых "сверху — вниз" действий, начиная от требуемых функций на уровне ВС.

Ниже описываются этапы типового процесса проектирования систем.

1. Процесс идентификации самолетных функций, функциональных требований и интерфейсов начинается с установления летно-технических характеристик ВС, эксплуатационных требований.

2. Результатом анализа последствий отказов функций и вызываемых ими ситуаций является установление связи каждой функции ВС с соответствующей классификацией отказного состояния

в зависимости от создаваемой опасности. Фиксация отказного состояния зависит от степени детализации различных показателей безопасности (табл. 1).

3. Результатом процесса распределения функций между системами и экипажем является совокупность требований ко всем действиям экипажа, к каждой системе ВС и к интерфейсам между ними.

4. Архитектура системы устанавливает структуру и границы, в пределах которых разрабатывается каждый компонент (изделие) системы с учетом всех заданных функциональных требований и требований безопасности. Для реализации могут рассматриваться несколько возможных вариантов архитектуры системы. Дополнительными ограничениями являются применяемые технологии, сроки реализации, годность для производства, себестоимость, готовность промышленности.

5. Процессы проектирования архитектуры системы и распределения требований между аппаратной частью и программным обеспечением являются тесно связанными итеративными процессами. С каждой итерацией растет понимание производственных требований, и распределение их становится все более обоснованным.

6. Процессы разработки аппаратной части и программного обеспечения должны предусматривать трассировку, прослеживание требований безопасности. В случае невозможности такой трассировки должно использоваться наихудшее отказное состояние.

7. В зависимости от вида системы и принятого процесса разработки интеграция аппаратной части и программного обеспечения может проводиться на макетах, опытных образцах, компьютерных эмуляторах или на изделиях, предназначенных для лабораторных или летных испытаний. Результатом является физическое изделие с контролируемой конфигурацией и данными по гарантии уровня разработки.

8. Процесс интеграции системы начинается с последовательной интеграции одного изделия с другим и завершается полной интеграцией системы.

Трудности точного прогнозирования или моделирования среды, в которой будет функционировать ВС, ведет к тому, что некоторые работы по интеграции выполняются непосредственно в ВС. Хотя

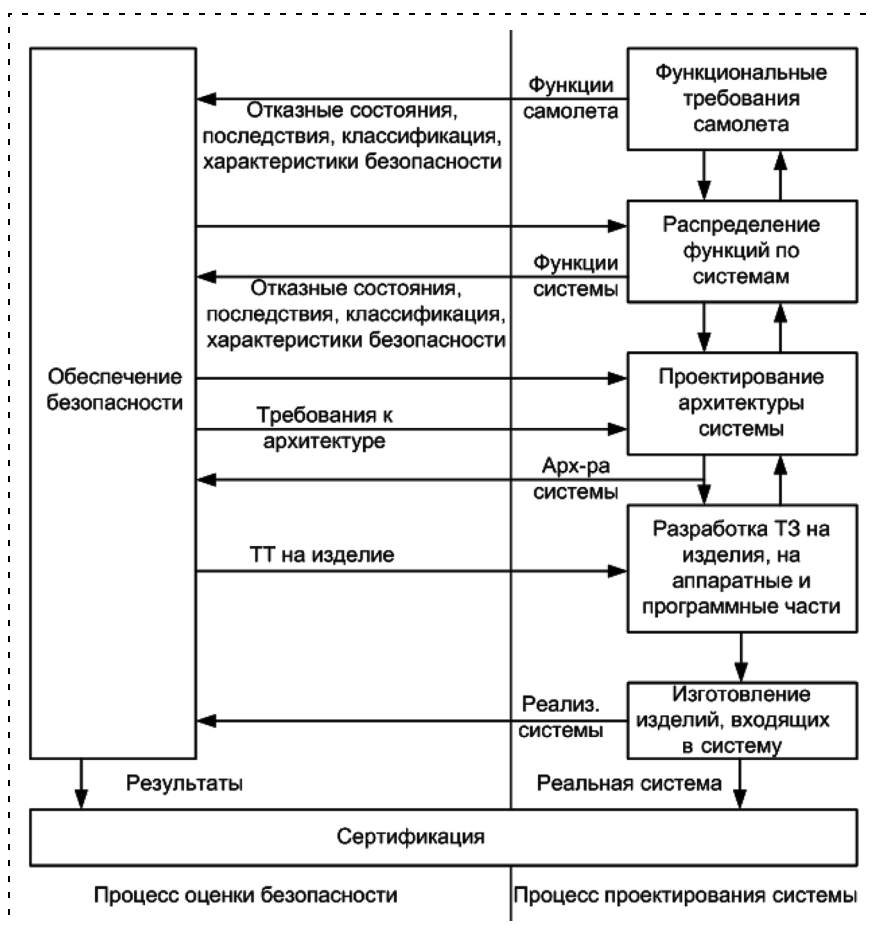


Рис. 2. Модель процесса разработки системы

Таблица 1

Классификация отказов и их влияние на безопасность

| Классификация отказного состояния | Катастрофическое | Аварийное | Сложное | Усложнение условий полета | Безопасное |
|---|------------------|---------------|---------------|---------------------------|------------|
| Количественные требования и показатели безопасности (на час полета) | $P < 10^{-9}$ | $P < 10^{-7}$ | $P < 10^{-5}$ | Нет | Нет |

Перечень сертификационных данных

| Сертификационные данные системы |
|--|
| План сертификации |
| План проектирования |
| Архитектура и конструкция |
| Требования |
| План валидации |
| План верификации |
| План управления конфигурацией |
| План гарантии выполнения процессов |
| Указатель конфигурации |
| Оценка функциональных рисков |
| Предварительная оценка безопасности системы |
| Оценка безопасности системы |
| Анализ общих причин отказов |
| Данные валидации |
| Данные верификации |
| Данные, подтверждающие наличие управления конфигурацией |
| Данные, подтверждающие гарантию выполнения процессов |
| Сертификационное заключение |
| Примечание: выделенные позиции составляют минимальный объем сертификационных данных. |

считается, что достоверность результатов интеграции, проведенной на ВС, высока, тем не менее, впечатляющие и экономически эффективные результаты можно достигнуть и в условиях лаборатории или моделирующего стенда.

Задачей интеграции систем является гарантия того, что раздельное и совместное функционирование аналогично их установке на ВС. Интеграция является средством доказательства соответствия межсистемным требованиям, а также дает возможность обнаружить и исправить функции, не предусмотренные для систем.

Этап, на котором распределяются требования между аппаратной частью и программным обеспечением, является переходом к рекомендациям документов DO-178B и DO-254.

Гарантия проектирования обеспечивает уверенность в том, что проектирование системы проводилось способом, ограничивающим вероятность появления ошибок, влияющих на безопасность ВС. В зависимости от классификации отказных состояний для систем и изделий устанавливаются "уровни гарантии проектирования" (уровни проекта), определяющие строгость и дисциплину выполнения поддерживающих процессов (табл. 2).

В обеспечении гарантии проектирования имеются два ключевых момента:

- своевременное отслеживание выполнения поддерживающих процессов;
- процесс оценки безопасности, взаимодействующий с другими процессами поддержки в ключевых точках проекта.

Для большинства высокоинтегрированных или сложных систем обеспечение гарантии проектирования осуществляется в течение большей части периода проектирования, т. е. сертификационный процесс рассматривается как процесс поддержки проектирования.

Целью процесса сертификации является доказательство соответствия ВС и его систем требованиям норм летной годности.

При сертификации высокоинтегрированных и сложных систем необходимо использование методов гарантии проектирования, поэтому рекомендуется как можно раньше (до реализации проекта)

Таблица 2

Назначение уровней гарантии проектирования системы

| Классификация отказного состояния | Уровень гарантии проектирования системы |
|---|---|
| Катастрофическое (Catastrophic) | A |
| Аварийное (Hazardous/Severe Major) | B |
| Сложное (Major) | C |
| Усложнение условий полета (Minor) | D |
| Отсутствие влияния на безопасность (No safety effect) | E |

обеспечить координацию действий заявителя с сертификационным органом. Методы оценки соответствия предлагает заявитель, сертификационный орган определяет достаточность данных для доказательства соответствия.

В табл. 3 приведены возможные сертификационные данные.

Процесс оценки безопасности

Оценка безопасности выполняется аналитически для проверки соответствия требованиям летной годности и включает конкретные оценки, корректируемые в процессе проектирования системы и увязанные с другими процессами поддержки ее проектирования. Ниже приведены основные процессы оценки безопасности (рис. 3).

1. Оценка функциональных опасностей (Functional Hazard Assessment — FHA), в ходе которой рассматриваются функции ВС и его систем в целях определения их возможных отказов, а также проводится классификация опасностей, связанных с ними отказных состояний. Оценка опасности функциональных отказов проводится на ранней стадии проектирования и пересматривается по мере появления новых функций или отказных состояний.

2. Предварительная оценка безопасности системы (Preliminary System Safety Assessment — PSSAs), в результате которой устанавливаются конкретные требования к безопасности системы и составляющих ее изделий и дается первоначальное подтверждение того, что предполагаемая архитектура системы будет удовлетворять этим требованиям. Предварительная оценка безопасности уточняется в процессе проектирования системы.

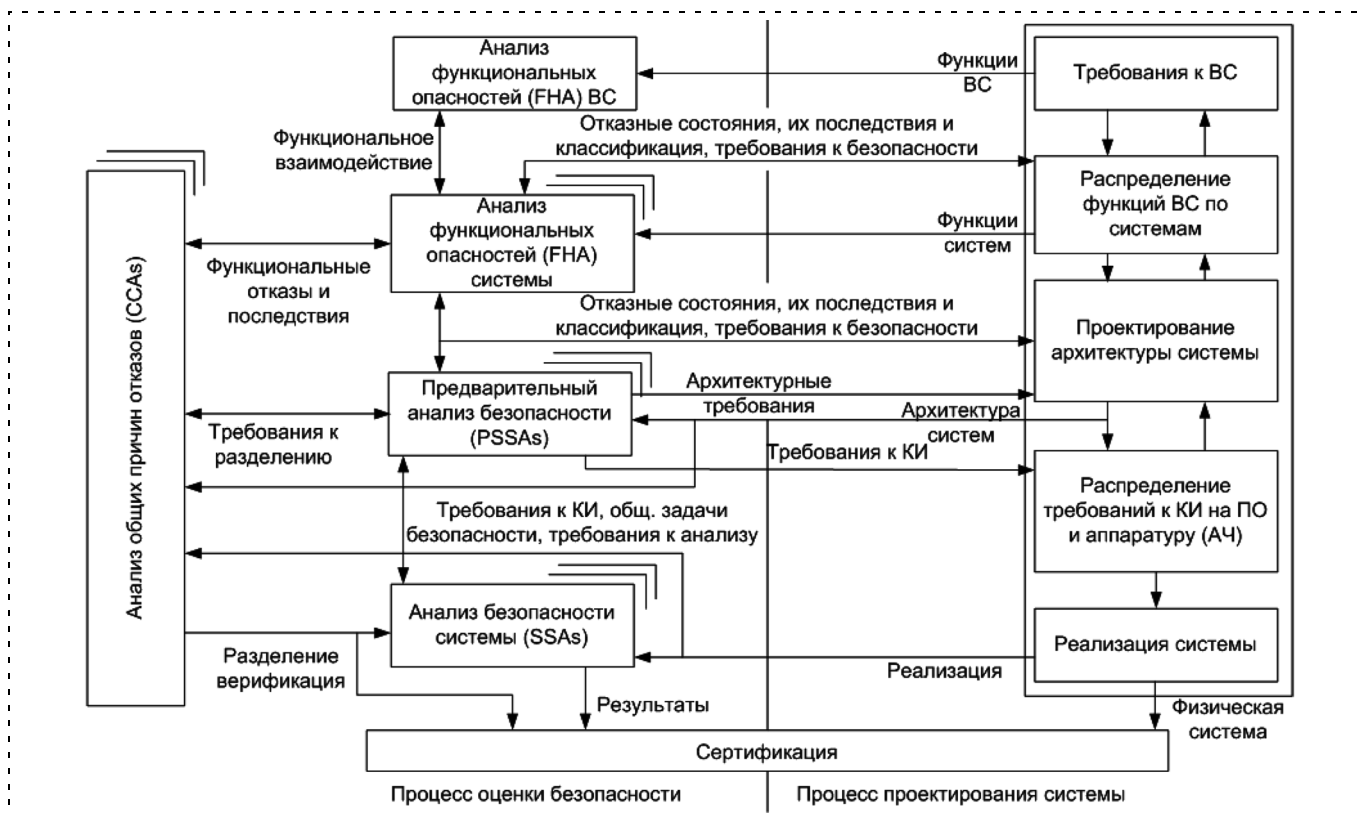


Рис. 3. Модель процесса оценки безопасности

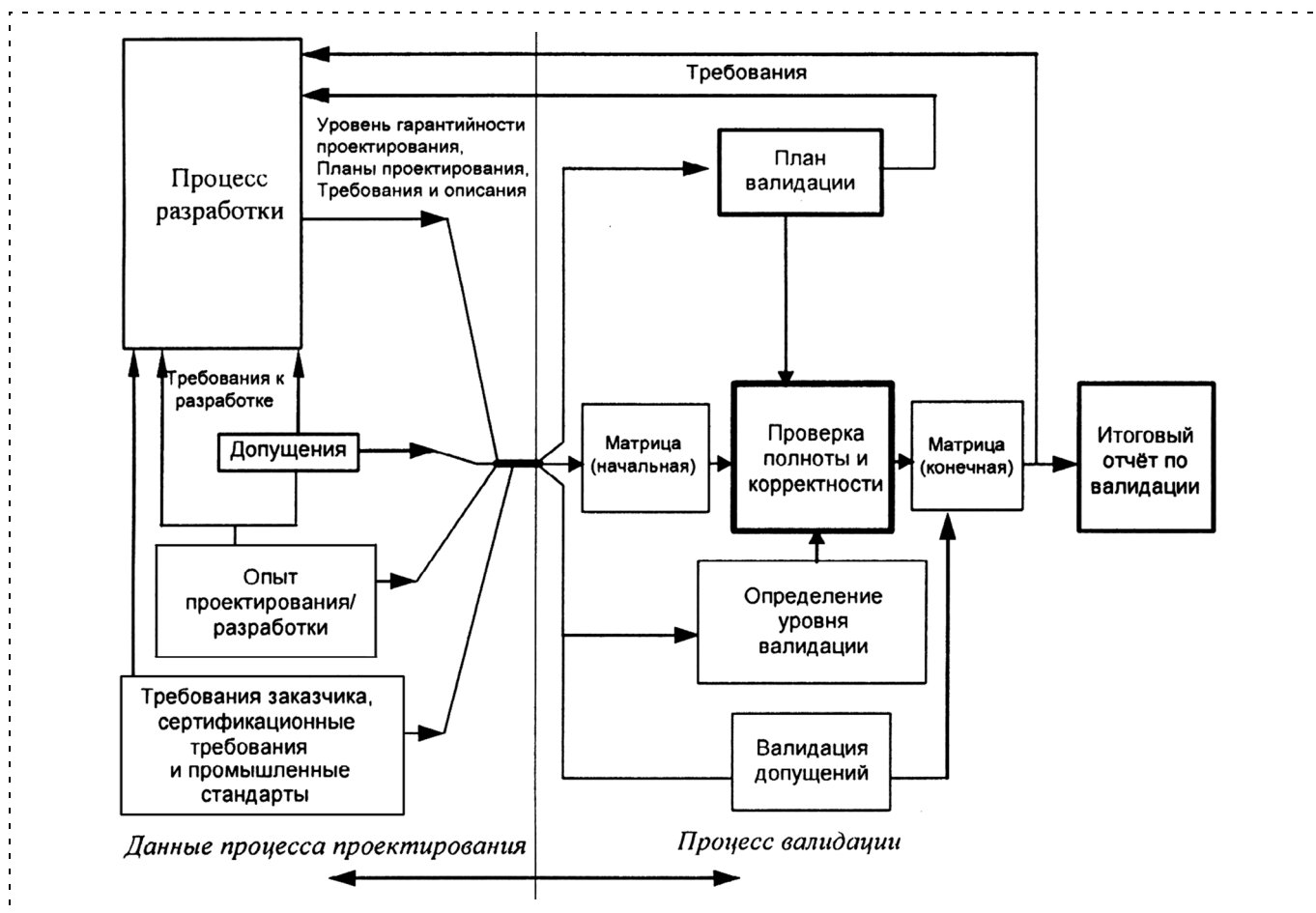


Рис. 4. Модель процесса валидации

Рекомендованные методы валидации

| Данные | А и В | С | Д | Е |
|---|-------|-------------------------------|---|---|
| Предварительный анализ безопасности системы | R | R | A | A |
| План валидации | R | R | A | N |
| Матрица валидации | R | R | A | N |
| Сводный отчет по валидации | R | R | A | N |
| Трассировка требований | R | A | A | N |
| Анализ, моделирование или испытания | R | Один из рекомендуемых методов | A | N |
| Сходство (опыт эксплуатации) | A | | A | N |
| Инженерное заключение | A | | A | N |
| Влияние на реализацию системы | R | A | A | N |

R — рекомендуемый для сертификации;
 A — по согласованию с сертифицирующим органом;
 N — не требуется для сертификации.

3. Оценка безопасности системы (System Safety Assessment — SSAs), в ходе которой собираются, анализируются и документируются доказательства того, что реализованная система удовлетворяет требованиям безопасности, установленным в процессах оценки функциональных опасностей и предварительной оценки безопасности.

4. Анализ общих причин отказов (Common Cause Analysis — CCAs), в ходе которого устанавливаются и оцениваются требования по физическому и функциональному разделению и изоляции систем, а также проверяется, как эти требования выполняются.

На рис. 3 показаны основные связи между этими четырьмя процессами оценки безопасности и процессами проектирования системы. В действительности существует значительно большее число взаимосвязей как между процессами, так и внутри них, но они опущены в интересах ясности рисунка.

Целями процесса валидации являются проверка правильности (отсутствия неоднозначности или ошибок в формулировке) и полноты (отсутствия пропусков или включения несущественных) требований. Валидация требований и допущений на верхних уровнях служит основой их валидации на более низких уровнях. Взаимосвязь процессов валидации и проектирования системы показана на рис. 4. Входная информация процесса валидации может включать в себя описание системы (включая ожидаемые условия эксплуатации, требования к системе, описание архитектуры системы и уровень гарантии проектирования).

В большинстве программ проектирования имеется ряд допущений, правильность которых нельзя доказать напрямую. Это допущения относятся

- к окружающим условиям и эксплуатации;
- к проектированию;
- к производству;
- к эксплуатационной технологичности;
- к установке оборудования.

Эти допущения могут использоваться на ранних этапах процесса проектирования при отсутствии более точной информации, которая будет получена позднее.

Для валидации допущений применяются экспертиза, анализы и испытания, показывающие, что архитектура системы ограничивает последствия ошибочно принятого допущения.

Основными методами валидации являются трассировка требований, анализ, моделирование, специальные испытания, имитация характеристик, анализ сходства, инженерные оценки. Уровень интенсивности валидации

определяется уровнем гарантии проектирования системы (табл. 4).

Отдельные методы валидации могут одновременно использоваться и при верификации. Подобная двойственная цель должна быть обеспечена координацией планов валидации и верификации.

Процесс верификации гарантирует, что реализованная система удовлетворяет предъявляемым к ней прошедшим валидацию требованиям.

На рис. 5 представлен общий вид модели верификации.

Для верификации любой системы или изделия могут использоваться четыре основных метода:

- осмотр и экспертная оценка;
- анализ и моделирование;
- испытания;
- опыт эксплуатации (табл. 5).

Анализ зарубежных подходов и процедур сертификации изделий авиационной техники показывает, что основная отличительная черта зарубежной

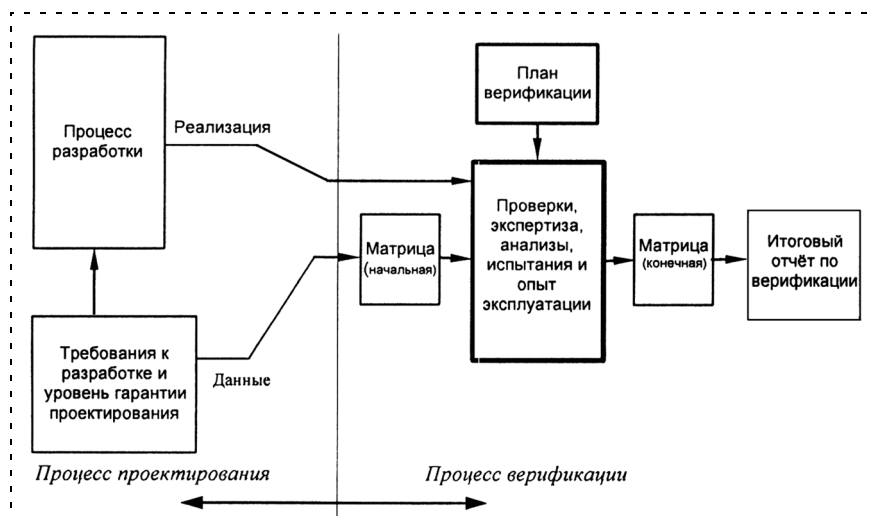


Рис. 5. Модель процесса верификации

Таблица 5

Верификационные методы и данные

| Методы и данные | Уровень гарантии проектирования | | | |
|---|---|----------------|---|---|
| | A и B | C | D | E |
| Матрица верификации | R | R | A | N |
| План верификации | R | R | A | N |
| Процедуры верификации | R | A | A | N |
| Заключение по результатам верификации | R | R | A | N |
| Оценка безопасности системы (SSAs) | R | R | N | N |
| Осмотр, экспертная оценка, анализ или испытания | Испытания и один или более из остальных методов | Один или более | A | N |
| Испытания на непредусмотренные функции | | | R | A |
| Опыт эксплуатации | A | A | A | A |

технологии проектирования заключается в сертификационной направленности всех видов работ, начиная с этапа эскизного проектирования, т. е. в применении так называемого принципа "сквозной" сертификации.

Для реализации указанного принципа уже на этапе эскизного проектирования разрабатывается программа сертификации, которая охватывает все виды работ.

Зарубежные авиационные фирмы относят разработку и развитие программы сертификации к серьезной инженерной работе, выполняемой проектировщиками под руководством специальной службы.

Программа "сквозной" сертификации должна включать: создание моделей, стендов и других установок, разработку или модификацию методов исследований, проведение моделирования, лабораторных, стендовых и летных испытаний с оценкой соответствия самолета и его оборудования нормам летной годности, разработку и реализацию технологии летных испытаний, оформление доказательной документации и таблиц соответствия и в завершение — представление материалов в орган по сертификации для получения сертификата летной годности.

Важнейшей процедурой реализации принципа "сквозной" сертификации является верификация, которая находит все большее применение в мировой практике, главным образом при проверке и оценке результатов проектно-конструкторских работ на начальном этапе создания новой техники.

К следующему этапу "сквозной" сертификации, проводимой на начальных стадиях разработки, можно отнести лабораторно-стендовые испытания.

Для придания лабораторно-стендовым испытаниям сертификационной направленности методы и средства проведения этих испытаний также должны быть подвергнуты процедурам верификации. Эффективность процесса "сквозной" сертифика-

ции характеризуется степенью готовности сертификационной документации, которая к началу летных испытаний должна составлять более 50 % от всего необходимого объема.

Летные испытания, играющие весьма важную роль в отечественной практике для оценки основных характеристик самолета и установления их соответствия нормам летной годности, за рубежом, как правило, имеют существенно меньшее значение. Осуществление на практике принципа "испытать все перед полетом" дает возможность до 80 % всех характеристик получить на земле.

В зарубежной практике период летных испытаний не рассматривается как созидательный, познавательный этап, а лишь как контрольный, зачетный. Основное внимание уделяется лишь тем видам испытаний, которые нельзя смоделировать в наземных условиях. Результаты летных испытаний, как правило, дают лишь 5...7 % расхождения с результатами моделирования и наземными испытаниями.

Такой подход целесообразен и с экономической точки зрения. Известно, что расходы на проведение одной доработки на стадиях моделирования, стендовой отработки и летных испытаний находятся в соотношении 1:10:100.

Таким образом в последние годы в США и Европе идет активная работа по совершенствованию политики и практики проектирования и сертификации воздушных судов гражданской авиации. Отсутствие русскоязычных регламентаций по проектированию и сертификации бортовых систем, гармонизированных с зарубежными, затрудняет сертификацию отечественной авиационной техники, а также взаимопонимание ее разработчиков с зарубежными сертификационными властями при продвижении своей продукции на мировой рынок. Поэтому в рамках созданной Авиационным регистром МАК рабочей группы с привлечением специалистов ведущих предприятий и организаций отечественной авиационной отрасли подготовлены русскоязычные версии документов (КТ-178В (действующая версия), КТ-254, P4754, P4761 (версия на стадии внедрения)).

Авторы статьи надеются, что приведенный обзор данных чрезвычайно объемных документов поможет специалистам в области создания высокоинтегрированных цифровых систем подготовиться к внедрению этих документов в повседневную практику их работы.

Список литературы

1. Крюков С. П., Бодрунов С. Д., Александровская Л. Н., Захаревич А. П., Круглов В. И. Корпоративный менеджмент постиндустриального общества. СПб.: Корпорация "Аэрокосмическое оборудование", 2005.
2. DO-178B.
3. DO-254.
4. ARP4761.
5. ARP4754.

**Указатель статей,
опубликованных в журнале
"Мехатроника, автоматизация,
управление" в 2009 г.**

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕХАТРОНИКИ
И АВТОМАТИЗАЦИИ**

Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики. № 6.

Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Роль и место неоклассической кибернетики в современной структуре системы знаний. № 6.

**МЕТОДЫ ТЕОРИИ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Анисимов А. А., Тарарыкин С. В. Формирование критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем. № 10.

Арановский С. В., Бобцов А. А., Николаев Н. А. Синтез адаптивного наблюдателя для хаотической системы Дуффинга. № 11.

Асанов А. З., Демьянов Д. Н. Задание передаточных нулей для обеспечения функциональной управляемости по выходу динамической системы. № 4.

Аюкасов Р. А. Синтез алгоритма оптимального управления стохастическими динамическими системами с запаздыванием. № 5.

Дударенко Н. А., Полякова М. В., Ушаков А. В. Достаточные алгебраические условия обобщенной синхронизируемости многоканальных динамических объектов. № 5.

Ким Д. П. К синтезу оптимальной линейной системы управления по критерию обобщенной работы. № 4.

Клодина Т. В., Межирицкий Е. Л., Погорелов В. А., Сапожников А. И. О применении распределения Пирсона для синтеза плотности вероятности марковского вектора состояния динамической системы. № 11.

Кочемасов А. В., Володин В. В. Определение сингулярных решений краевых задач в динамических системах на основе процедуры разложения на ортогональные пространства. № 8.

Кочетков В. П., Подборский П. Э., Коловский А. В. Оптимизация динамики электромеханической системы с помощью систем с переменной структурой. № 10.

Краснова С. А., Уткин В. А., Уткин А. В. Блочный синтез управления механическими системами в условиях неопределенности. № 6.

Лопатин П. К. Исследование достижимости целевых состояний в неизвестной статической среде. № 4.

Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Абсолютная устойчивость одного класса интеллектуальных САУ с ассоциативной памятью. № 1.

Макаров Н. Н., Владимиров К. И. Предельные отклонения в кусочно-линейных системах управления. № 10.

Медведев М. Ю. Синтез замкнутых оптимальных по быстродействию управлений каскадными нелинейными динамическими системами с ограничениями на координаты. № 7.

Медведев М. Ю. Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами. № 12.

Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия. № 11.

Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Оптимизация управления в многоточечных задачах о встрече движений. № 10.

Мышляев Ю. И. Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределенности на основе настраиваемого скользящего режима. № 2.

Перепелкин Е. А. Численный метод редукции задачи модального управления многомерными объектами. № 8.

Погорелов В. А., Клодина Т. В. Синтез алгоритмов нелинейной фильтрации на основе использования информационных критериев. № 5.

Рогачев Г. Н. Использование гибридно-автоматного метода для описания систем автоматизации и управления. № 12.

Сафронов В. В., Быстров Л. Г. Построение и ранжирование полного множества матриц, сопровождающих характеристический полином, в задачах моделирования, анализа и синтеза САУ. № 5.

Сельвесюк Н. И. Адаптация параметров оптимального управления на основе прямых и обратных задач оптимизации. № 9.

Сельвесюк Н. И. Рекурсивный алгоритм синтеза регуляторов заданной точности для стохастических ММО-систем. № 1.

Сельвесюк Н. И. Численный алгоритм синтеза регуляторов заданной точности по выходу для многосвязных систем. № 12.

- Слита О. В., Ушаков А. В., Цвентарный А. Ю.** Синтез модального управления, доставляющего непрерывной системе гарантированный запас устойчивости. № 9.
- Фалдин Н. В., Моржов А. В.** Анализ вынужденных периодических движений в релейных системах автоматического управления. № 1.
- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движений в задачах синтеза систем автоматического управления. № 2.
- Фургат И. Б.** Модифицированный алгоритм робастного обхода интегратора. № 10.
- Фургат И. Б.** Робастное субоптимальное управление линейными нестационарными объектами по выходу. № 7.
- Чернышев А. Б.** Адаптация частотного критерия абсолютной устойчивости к системам с распределенными параметрами. № 7.
- Яковис Л. М., Спорягин К. В.** Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления. № 6.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Балашов В. С., Громов Б. А., Ермолов И. Л., Роскилли А. П.** Автономный робот для очистки корпусов судов HISMAR. № 9.
- Васенин П. К., Негодяев С. В., Осипов Ю. М., Щербинин С. В.** Управление многокоординатной манипулятор-платформой при обработке поверхностей сложной формы. № 7.
- Васильев А. В., Полин А. В.** Мобильный робот-разведчик на базе шестигусеничного движителя с изменяемой геометрией. № 3.
- Володин Ю. С.** Метод кодирования структурной подсветки для телевизионной системы объемного зрения робототехнического комплекса. № 11.
- Гайдук А. Р., Капустян С. Г., Шаповалов И. О.** Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом. № 7.
- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Метод силового обучения при планировании траекторий робота для восстановительной медицины. № 10.
- Горитов А. Н.** Построение плана траектории промышленного робота в условиях неполной информации о внешней среде. № 10.
- Егоров О. Д., Батунова В. А.** Определение погрешности позиционирования робота с учетом первичных ошибок и погрешностей обобщенных координат. № 10.

- Ивченко В. Д., Корнеев А. А.** Анализ методов распределения заданий в задаче управления коллективом роботов. № 7.
- Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Медведев А. В., Павин А. М., Севрюк А. В., Сенин Р. А., Бобков В. А., Борисов Ю. С., Мельман С. В.** Имитационный моделирующий комплекс для "интеллектуального" автономного подводного робота. № 2.
- Каляев И. А., Капустян С. Г.** Проблемы группового управления роботами. № 6.
- Кобрин А. И., Мартыненко Ю. Г., Письменная Е. В.** Всероссийский научно-технический фестиваль молодежи "Мобильные роботы" имени проф. Е. А. Девянина. № 5.
- Саад Загхлюл Саид Аль Кхаит.** Система управления траекторией манипулятора с упругими звеньями, основанная на использовании адаптивной нейронной сети. № 4.
- Тищенко А. С., Михайлов Б. Б.** Навигация мобильного робота на основе системы технического зрения. № 12.
- Филаретов В. Ф., Кацурин А. А., Пугачев Ю. А.** Метод полуавтоматического комбинированного управления манипулятором с помощью подвижной телекамеры. № 2.
- Чернакова С. Э.** Моделирование процесса обучения интеллектуальных автономных систем и роботов методом показа движения. № 2.
- Чикуров Н. Г., Гончаров А. В.** Построение математической модели манипуляционного робота методом электроаналогий. № 9.

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Абрамов А. Ю., Диков О. В., Рябухо В. П., Шиповская А. Б.** Лазерные интерференционные измерения процессов взаимодиффузии в прозрачных средах. № 1.
- Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В.** Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание. № 4.
- Беленький Л. Б., Боровик С. Ю., Логвинов А. В., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П., Тулупова В. В.** Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Часть 2. Реализуемость методов. № 5.

Дунин-Барковский И. И. Мехатронные системы для высокоточного трехмерного контроля размеров на основе активных систем технического зрения в современных технологиях. № 5.

Игнатьев С. А., Игнатьев А. А., Иващенко В. А. Автоматизированные системы мониторинга технического состояния технологического оборудования. № 8.

Лебедев В. Ф., Подкопаева С. В., Гайворонская И. П., Хромых Е. А. Диагностика состояния технологических процессов и оборудования в производстве термоэластопластов с использованием фреймово-продукционного представления знаний. № 4.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Афонин С. М. Исследование характеристик шагового пьезодвигателя нано- и микроперемещений. № 11.

Буканова Т. С., Стешина Л. А., Савиных А. Б. Оптимизационная концепция построения системы управления электрической машины. № 10.

Бухгольц Ю. Г., Новокрещенов О. И., Приступ А. Г., Шевченко А. Ф. Разработка отрезка серии магнитоэлектрических синхронных электродвигателей с дробными зубцовыми обмотками. № 11.

Винокуров С. А. Особенности формирования микропроцессорного управления в электромеханических системах с бесконтактными двигателями постоянного тока. № 1.

Иванчура В. И., Суханов В. В., Никулин Н. А. Электропривод с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока. № 11.

Козырев В. В., Кожевникова М. В. Система анализа и синтеза силовой части мехатронных модулей. № 2.

Кондратьев В. А. Исследование электромагнитных сил в динамике электромагнитного механизма. № 1.

Кузовкин В. А., Филатов В. В. Моделирование асинхронного двигателя в программной среде Electronics Workbench. № 1.

Леонов Г. А., Кондратьева Н. В. Электромеханические и математические модели синхронных электрических машин. № 6.

Макаренко М. Н., Самсонович С. Л. Выбор параметров плунжерного волнообразного гидравлического силового минипривода при заданном диаметре опорного устройства. № 1.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Визильтер Ю. В. Модульные схемы построения мультитонных морфологических операторов анализа цифровых изображений. № 2.

Визильтер Ю. В. Модульные схемы построения проективных морфологических операторов анализа цифровых изображений. № 4.

Чебурахин И. Ф., Цурков В. И. Оптимизация и автоматизация синтеза симметрических комбинационных автоматов на основе базовых матричных кристаллов. № 7.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Анисимов В. М., Высоцкий В. Е., Кауров С. Ю., Репин А. С. Применение встроенного микроконтроллера для системы управления стартер-генераторной установки. № 10.

Ануров Ю. М., Пушкарев А. Д., Кушцов А. Б., Максютин М. М. Синергетическое управление турбогенератором с бесщеточной системой возбуждения. № 8.

Бобков С. Г. Проблемы создания быстродействующих системных контроллеров промышленного применения. № 1.

Бусурин В. И., Шток К. В. Интегрированный преобразователь давления и температуры на основе оптического туннельного эффекта. № 2.

Ведерников Ю. В. Метод построения интервальных отношений предпочтения на множестве альтернативных вариантов технической системы. № 2.

Волосатова Т. М., Жиряков С. М., Рогозин О. В., Филиппов М. В. Применение аппарата нечеткой логики в построении контроллеров. № 1.

Гоппе Г. Г. Математические модели технологического комплекса электропривод — турбомеханизм — трубопроводная магистраль. Ч. 1. Статические режимы при двух способах управления производительностью. № 10.

Гоппе Г. Г. Математические модели технологического комплекса электропривод — турбомеханизм — трубопроводная магистраль. Ч. 2. Математические модели динамических процессов при управлении производительностью методом дросселирования. № 12.

Градецкий В. Г., Князьков М. М., Каменева О. Н., Семенов Е. А., Чашухин В. Г. Система моделирования движений человека для промышленных применений. № 4.

Захаров О. В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами. № 9.

- Казарьян А. В., Балакший В. И.** Условия динамической устойчивости акустооптической системы с распределенной запаздывающей обратной связью. № 1.
- Капустян С. Г., Кулиничев Р. Н.** Групповое управление оборудованием автоматизированных складских систем. № 9.
- Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Рассказчиков А. Н.** Управление процессом кристаллизации сплава В95. № 8.
- Кузнецов Н. А., Гречишкина Н. А.** Системы управления нанообъектами. № 6.
- Лебедев В. А.** Современное дуговое автоматизированное и механизированное сварочное оборудование как мехатронная система. № 9.
- Мартинов Г. М., Григорьев А. С.** Принцип построения и интеграции в системах ЧПУ класса PCNC подсистемы трехмерной визуализации управляющих программ. № 9.
- Мартинов Г. М., Любимов А. Б., Обухов А. И.** Проблема адаптации систем ЧПУ класса PCNC к станкам лазерной графики. № 1.
- Медведев Д. А., Осипов О. Ю., Осипов Ю. М., Щербинин С. В.** Создание лазерных технологических комплексов по критерию цена/качество. № 12.
- Мяготин А. В.** Тензорный метод анализа процессов пенообразования в проекционных изображениях. № 12.
- Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Ишметьев Е. Н., Усачев М. В., Михальченко Е. С., Наливкин А. К.** Синтез системы оптимального управления электрическим режимом сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-180. № 8.
- Прохоренко Е. В., Норбоев Б. Р.** Разработка и исследование математической модели электромеханической системы синхронного вакуумного выключателя. № 12.
- Ряжских В. И., Никифорова О. Ю.** Математическое моделирование процесса непрерывной газоподготовки замкнутых объемов. № 2.
- Савин Л. А., Соломин О. В., Дорофеев Л. В.** Активные магнитные подшипники: принципы функционирования и моделирования. № 2.
- Стебулянин М. М.** Комбинационный метод синтеза управления многосвязными мехатронными системами в режиме динамического позиционирования. № 10.
- Сторублев М. Л.** Определение показателей точности технологических процессов в ходе их выполнения на основе теории чувствительности. № 8.
- Суздальцев А. И., Петров С. П.** Параметрический синтез системы управления локальным контуром теплоснабжения по критерию минимума энергетических затрат. № 2.
- Супоня А. А.** Определение требований к надежности элементов сложного изделия на этапе проектирования. № 2.
- Чикуров Н. Г.** Синтез математических моделей механических систем методом электроаналогий. № 4.
- Шестаков В. М., Епишкин А. Е., Нагин Г. В.** Разработка и исследование системы стабилизации колебаний шестироторной вибрационной установки. № 12.

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

- Алексеев К. Б., Малявин А. А., Палагута К. А.** Сравнительный анализ предикторного и нечеткого управления движением автомобиля. № 5.
- Девятисильный А. С., Дорожко В. М.** Управление безопасным движением автомобилей в транспортном потоке. № 5.
- Ляхов С. В., Белоус М. М.** Комплекс для исследования систем активной безопасности автомобиля. № 5.
- Михеева Т. И., Сапрыкин О. Н.** Самоорганизующиеся модели в интеллектуальных транспортных системах. № 1.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВООРУЖЕНИЕМ

- Буренок В. М.** Основные направления и перспективы создания автоматизированных систем управления развитием вооружения, военной и специальной техники. № 3.
- Ваганов Н. И.** Перспективы развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации. № 3.
- Крайлюк А. Д., Комченков В. И., Ивлев А. А., Юрин А. Д.** Основы концепции развития робототехники военного назначения до 2030 г. № 3.
- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ивлев А. А., Юрин А. Д.** Перспективы и реалии применения интеллектуальных технологий управления и обработки информации при создании образцов вооружения и военной техники нового поколения. № 3.
- Сазыкин Ю. М., Филиппов С. И.** Мехатронные системы управления огнем и наведением огневых средств артиллерии. № 4.

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

- Августов Л. И., Сорока А. И.** Бортовой гравивариометр. Опыт разработки и результаты стендовых испытаний. № 3.
- Алешин В. И., Крыжановский Г. А., Купин В. В.** Исследование неравномерности транспортных потоков при управлении воздушным движением. № 4.
- Верба Г. Е., Глубятников В. Н., Кирилин А. Н., Пшихопов В. Х., Старостин И. А., Ступников В. И.** Современное состояние и перспективы использования воздухоплавательных комплексов. № 3.
- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Позиционно корректируемая гравиинерциальная навигационная система. № 4.
- Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Сазонова Т. В., Щербунов Г. И.** Вопросы разработки и стандартизации бортовых форматов векторной электронной карты для летательных аппаратов. № 3.
- Евстифеев М. И.** Проблемы проектирования и опыт разработки микромеханических гироскопов. № 6.
- Костяшкин Л. Н., Павлов О. В., Трофимов Д. В.** Проблемные аспекты разработки наשלемых систем целеуказания и индикации для вертолетов. № 3.
- Лебедев А. В., Филаретов В. Ф.** Система с переменной структурой для централизованного управления движением автономного подводного аппарата. № 4.
- Макаров Н. Н., Солдаткин В. М.** Методология построения и исследования информационно-управляющих систем обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса. № 4.
- Пешехонов В. Г., Несенюк Л. П., Грязин Д. Г.** Микромеханические инерциальные преобразователи. Современное состояние и применение в военной технике. № 3.
- Половко С. А., Смирнова Е. Ю., Степанов Д. Н.** Интеллектуальные системы технического зрения для безопасности и навигации. № 3.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Аветисян Ю. А., Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Родичев В. А.** Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций. № 11.
- Безродный А. А.** Оптимизация обслуживания автотранспортных средств на автозаправочных станциях с использованием автоматизированных автозаправочных терминалов. № 11.

- Боев С. Ф., Рахманов А. А., Слока В. К.** Сетевые системы регионального уровня реального масштаба времени. № 3.
- Косинский М. Ю., Шихин В. А.** Исследование возможностей нечетких моделей для оценивания эксплуатационной надежности автоматизированных систем. № 8.
- Резчиков А. Ф., Иванов А. С., Домнич В. С.** Анализ аварий в человеко-машинных системах с использованием моделей причинно-следственных связей. № 7.
- Смирнов А. В., Кашевник А. А., Левашова Т. В., Шилов Н. Г.** Теоретические и технологические основы построения контекстно-управляемых систем поддержки принятия оперативных решений в открытой информационной среде. № 3.
- Тарасов Е. Н., Ивлиев Р. С.** Изменение состояния автоматизированной информационной системы с централизованным управлением. № 3.

МЕХАТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

- Бакусова З. И., Бодин О. Н., Востриков А. А.** Использование моделирования периодики Венкебаха для оценки степени тренированности сердца. № 8.
- Бураков В. В.** Модели и алгоритмы управления качеством программных средств на примере приложения для военной телемедицины. № 5.
- Бушманов А. В., Дрюков А. А.** Имитационное моделирование процессов компрессии и дистракции отломков костей аппаратом остеосинтеза. № 5.
- Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В.** Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине. № 9.
- Князь В. А., Крыченков В. Ф., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Салтыкова Е. Б.** Диагностика патологий зрения человека по антропометрическим данным лица методами технического зрения. № 8.
- Козлов С. В., Чумаков Д. М., Точинский Е. Г.** Многофункциональный контроллер видеокамеры рентгеновского преобразователя. № 9.
- Матвеев И. А.** Алгоритм поиска радужки глаза по взаимосвязным максимумам проекций градиентов яркости. № 5.
- Морозов В. В., Жданов А. В., Беляев Л. В.** Разработка мехатронного модуля имплантируемой системы искусственного сердца и его лабораторно-стендовые испытания. № 5.
- Сидорова М. А., Ерушова Н. А.** Обоснование выбора параметров нейросетевой скрининговой диагностики нарушений системы гемостаза. № 8.

**"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА
В АВИАКОСМИЧЕСКИХ
И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"**

- Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И.** Особенности менеджмента качества и сертификации бортовых систем воздушных судов. № 12.
- Ахметов Р. Н., Головченко А. А., Макаров В. П., Соллогуб А. В.** Особенности полетной калибровки бортовой аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. № 7.
- Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В.** Проблема обеспечения сбое- и отказоустойчивости бортовой аппаратуры космического аппарата дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства. № 11.
- Бобров М. С., Аверьянов А. М., Чекушкин В. В.** Имитация траекторий движения воздушных объектов для радиолокационных систем управления и контроля воздушного пространства. № 9.
- Волков А. Б., Каретников В. В., Сикарев И. А.** Алгоритмы определения дальности и радиуса зоны действия автоматической информационной системы в условиях сложной помеховой обстановки. № 10.
- Гребнев О. Н., Корсун О. Н.** Минимизация погрешностей идентификации, обусловленных неточной информацией о структуре математической модели летательного аппарата и системы измерений. № 9.
- Грибков В. Ф., Корнеев Н. И., Шестопалов Е. В.** Математическая модель бортовой радиолокационной станции для базы знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы. № 12.
- Девятисильный А. С., Числов К. А.** Модель гравитационно-инерциальной системы на подвижном основании. № 8.
- Заведеев А. И.** Исследование точности астрономической системы управления ориентацией космического аппарата. № 8.
- Заведеев А. И., Архипов Р. А.** Особенности применения малоизбыточных кратных гиросиловых систем управления ориентацией космических аппаратов. № 10.
- Ивченко Н. К., Ивченко А. В.** Аналитический подход к проблеме монтажных искажений быстро-вращающейся опоры гиросприбора. № 8.
- Крыжановский Г. А., Солодухин В. А.** Методологические и прикладные аспекты обратной задачи оптимизации в процессах принятия решений при управлении воздушным движением. № 11.
- Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А., Ефимов А. В.** Нейросетевое планирование групповых действий летательных аппаратов при наблюдении заданной группы подвижных наземных объектов. № 11.
- Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо.** Оценка эффективности организации взаимопомощи в многоканальных авиакосмических системах. № 7.
- Левин Д. Н., Пономаренко А. В., Сильвестров М. М.** Концептуальный облик и особенности построения диалоговых моделирующих комплексов и действующего макета кабины для эргономического сопровождения разработки эргатического информационно-управляющего комплекса перспективного многофункционального маневра самолета. № 12.
- Прошин И. А., Тимаков В. М., Прошкин В. Н.** Тренажер вертолета с имитацией посадки на взволнованную водную поверхность. № 9.
- Разумовский А. И., Ромакин В. А.** Построение и анализ 3D-модели рельефа местности с использованием программного комплекса "Relief Studio". № 7.
- Сильвестров М. М., Чернышев В. А.** Современная методология и концептуальные основы построения эргатического интегрированного комплекса управления многоцелевого маневренного самолета. № 7.
- Хахулин Г. Ф., Новиков С. А., Посадский А. И., Ескин В. И.** Задачи формирования и динамической корректировки плана наблюдений в системе космического мониторинга подвижных морских объектов. № 11.
- Челноков Ю. Н., Логинов М. Ю.** Дифференциальные уравнения ошибок корректируемой БИНС, функционирующей в нормальной географической системе координат. № 10.

CONTENTS

- Medvedev M. Yu.** Design of the Sub-Optimal Controls for Nonlinear Multiply Connected Dynamic Systems 2
At this paper design of the closed loop time sub-optimal controls for multiply connected nonlinear dynamic systems presented at controlled Jordan form is proposed. It is supposed that state space variables as well as controls are limited. At this case time sub-optimal controls are designed for the cascade systems. The proposed controls are satisfied to maximum principle of Pon-tryagin.
Keywords: time optimal control, nonlinear multiply connected systems, robustness, principle of maximum.
- Selvesyuk N. I.** The Numerical Algorithm for Output Given Accuracy Regulator Synthesis to MIMO System 9
In article described the methodic for output regulator synthesis to MIMO linear stochastic control systems. It provided given demands of control parameters accuracy. The mentioned demands formulated through diagonal elements of covariance matrix of closed-loop system. For definition the feasible covariance matrix used numerical algorithm which based on decision a system of linear matrix inequalities. The methodical numerical example is presented.
Keywords: linear stochastic control system, covariance matrix, matrix canonization, output regulator of given accuracy, linear matrix inequality.
- Rogachey G. N.** Algorithmic Method of the Description of Hybrid-Automatic Regulators 14
In article the algorithmic method of description computer control systems based on the hybrid automatic form is considered. Universality of the considered approach is illustrated by examples from various subject domains, among which the P-, PI-, PID-regulators, nonlinear and optimum regulators.
Keywords: computer control system, hybrid automatic, algorithmic method.
- Goppe G. G.** Mathematical Models of the Technological Complex "Electric Drive—Turbomechanism—Pipeline". Part 2. Mathematical Models of Dynamic Processes by Efficiency Control by Means of Strangling Method 20
For separate elements as well as complex as whole we developed mathematical models of dynamic processes when efficiency control is performed by means of strangling method. The structural chart of the control system was investigated on the personal computer by the adjustment of master control.
Keywords: mathematical model, electric drive, turbomechanism, pipeline, operating mechanism, strangling, structural chart, regulator.
- Prokhorenko E. V., Norboev B. R.** Design and Research of Mathematical Model of Synchronies Vacuum Circuit-Breaker Electromechanical System 25
Requirements for static and dynamic characteristics of electromechanical system of the vacuum circuit-breaker taking into account the physical and constructional parameters of vacuum interrupter have been formed. The functional scheme for the construction of synchronous vacuum circuit-breaker based on the original solution has been defined. Simulation results of the proposed mathematical model and experimental data of a real object have been shown.
Keywords: synchronous vacuum circuit-breaker, mathematical model of electromechanical system.
- Myagotin A. V.** A Tensor Approach for a Digital Analysis of Foaming Processes in Projection Images 30
An image analysis procedure is described allowing for vector field estimations in radiographic image sequences of evolving metal foams. In this work we apply a tensor approach in combination with an adaptive Gaussian window interpolation technique. The applicability of the procedure is demonstrated by an image analysis of real radiographic sequences of foaming metals.
Keywords: radiography, velocity vector field, optical flow, tensor approach, metal foam.
- Shestakov V. M., Epishkin A. E., Natsin G. V.** Development and Research Oscillations Stabilizing System of Six-Rotary Vibration Machine 35
There are construction conception control system a six-rotary vibration machines are proposed. The mathematical formulation electromechanical system are developed, rational structure and optimization dynamic methods are determined, which provide vibroplatform stabilized oscillations. The imitation modeling of electromechanical systems vibration machines dynamic in defined area of quasi-established modes are verify functioning availability developed system.
Keywords: vibration machines, electromechanical systems, mathematical models, methods of construction and optimization, controlled oscillations.
- Medvedev D. A., Osipov O. Yu., Osipov Yu. M., Sherbinin S. V.** The Optimal Prize to Quality Ratio in Laser Complex Manufacture 41
Laser technological complex (LTC) including multicoordinate manipulator is considered. The problem of control of LTC is discussed.
Keywords: multicoordinate manipulator, arc electromechatronic module of movement, operating characteristics.

Tishchenko A. S., Mikhaylov B. B. Vision-Based Positioning System Developing for Mobile Robot Navigation . . . 44
Vision-based positioning system for mobile robot navigation is discussed. Landmark-based positioning technique is developed. General image processing procedures and algorithms are described. Real-time experiment results are given.

Keywords: landmark-based positioning, mobile robot, image processing system, object recognition.

Levin D. N., Ponomarenko A. V., Silvestrov M. M. Concept and Construction Features for Dialogue Simulator Complexes and Functional Cockpit Mock-up for Ergonomic Support of Ergatic Data-Controlling System Development for Advanced Multirole Maneuverable Aircraft 52

The following issues are under consideration: wide and effective development and use of dialogue simulator complexes, functional cockpit mock-up, unified part task simulator for thorough step-by-step ergonomic support of ergatic data-controlling system development for advanced multirole maneuverable aircraft using objectif and anthropo-centric methodology for rational coordination of interaction between person, equipment and module of control task generation.

Keywords: objectif and anthropo-centric methodology, ergatic data-controlling system, module of control task generation, data-controlling field, dialogue simulator complex, functional cockpit mock-up, unified part task simulator, dialogue complex of search simulation, information model, mnemonic frame, indication frames, noninstrumental information simulator, synthesis module of control rules.

Gribkov V. F., Korneev N. I., Shestopalov E. V. A Mathematical Model of Airborne Radar for On-Board Operative Advising Expert System Knowledge Base 60

The article describes the structure and composition of the mathematical model of airborne radar (BRLS). The airborne radar model is designed for use in the On-board operative advising expert system (BOSES), typical combat scenario "Entering of the group into air battle state." The given set of functional requirements for the model of BOSES allows to implement the model of radar programmatically, by limiting the scope of structure. The developed system evaluates the output of simulated targets beyond the zone of surveillance and their entrance to the "blind" perspective. The article also presents the results of modeling.

Keywords: airborne intelligence, surveillance zone, predicting behavior, expert systems, radar, avionics.

Aleksandrovskaya L. N., Kuznecov A. G., Solonnicov Yu. I. Features of a Quality Management and Certification of Aircraft On-Board Systems 66

This article contains the analysis of several foreign normative documents (DO-178B, DO-254, ARP4561, ARP4754), Russian versions of which have been prepared and are currently introduced into designing and certificating of the aircraft on-board equipment.

It is shown that introduction of a modern trend in designing technology, reflected in these documents, leads to reconsideration of balance between basic design stages such as mathematical modeling, developmental testing and flight tests towards transferring the basic amount of work to ground-based testing and reductions of flight tests.

Keywords: normative documents, DO-178B, DO-254, ARP4561, ARP4754, certificating of the aircraft on-board equipment.

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

Сдано в набор 28.09.2009. Подписано в печать 13.11.2009. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,12. Заказ 996. 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