

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 17
2016
№ 4

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цыкунов А. М. Робастное управление объектом с распределенным запаздыванием и неизвестным порядком математической модели 219

Афанасьев Г. Д., Афанасьева И. Г. Расчет параметров распределенных систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством. . . 227

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Болотник Н. Н., Жуков А. А., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Смирнов И. П. Перспективы использования полиимида в исполнительных устройствах мехатронных микросистем 233

Егоров О. Д., Буйнов М. А. Структурный анализ механизмов мехатронных и робототехнических устройств 239

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Тарасов Е. Н. Управление в эргатических распределенных системах обработки данных . . 245

Карташев В. А., Богуславский А. А., Соколов С. М. Обеспечение безопасности работы оператора методом разделения рабочих зон работа и человека 249

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Коренев П. С., Митришкин Ю. В., Патров М. И. Реконструкция равновесного распределения параметров плазмы токамака по внешним магнитным измерениям и построение линейных плазменных моделей 254

УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Косов А. А., Ульянов С. А. Об определении ориентации и стабилизации космического аппарата с помощью наблюдателя состояния 267

Филимонов А. Б., Фам Фыонг Кыонг. Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей 273

Rzevski G. A., Knezevic J., Скобелев П. О., Боргест Н. М., Симонова Е. В., Лахин О. И. Новый подход к управлению жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности с использованием теории сложности 282

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S. N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMEENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E. V., Russia, Moscow

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

- Tsykunov A. M.** Robust Control of Object with Distributed Delay and Unknown Order of Mathematical Model 219
Afanasyev G. D., Afanasyeva I. G. Calculation of the Parameters of the Distributed Automatic Control Systems with Parallel Corrective Devices 227

ROBOTIC SYSTEMS

- Bolotnik N. N., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Smirnov I. P.** Prospects for Using Polyimide in Actuators of Mechatronic Microsystems 233
Egorov O. D., Buynov M. A. Structural Analysis of Mechanisms of the Mechatronic and Robotic Devices 239

ERGATIC CONTROL SYSTEMS

- Tarasov E. N.** Ergatic Distributed Data-Processing Systems Control 245
Kartashev V. A., Boguslavsky A. A., Sokolov S. M. Maintenance of Safety in Man-robot Co-working Operations by the Highlighted Area Method 249

CONTROL OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

- Korenev P. S., Mitrishkin Y. V., Patrov M. I.** Reconstruction of Equilibrium Distribution of Tokamak Plasma Parameters by External Magnetic Measurements and Construction of Linear Plasma Models 254

CONTROL AND INFORMATION PROCESSING IN AEROSPACE SYSTEMS

- Kosov A. A., Ul'yanov S. A.** On Spacecraft Attitude Determination and Stabilization Using State Observers 267
Filimonov A. B., Pham Phuong Cuong. Methods for Formation Information Signatures of the Radar Range Profiles of the Aerial Targets 273
Rzevski G. A., Knezevic J., Skobelev P. O., Borgest N. M., Simonova E. V., Lakhin O. I. A New Approach to Managing Life Cycle of Aerospace Products using Complexity Theory . . 282

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

А. М. Цыкунов, д-р техн. наук, проф., tsygunov_al@mail.ru,
Астраханский государственный технический университет

Робастное управление объектом с распределенным запаздыванием и неизвестным порядком математической модели

Решается задача робастного управления объектом с распределенным запаздыванием, когда на него действуют ограниченные внешние возмущения, а порядок и параметры математической модели неизвестны. Получен алгоритм управления, позволяющий компенсировать априорную неопределенность параметров и существенно подавить внешние ограниченные возмущения. Приводится числовой пример и результаты моделирования.

Ключевые слова: распределенное запаздывание, робастное управление, целевое условие, функционал, эталонный сигнал, сингулярная система уравнений

Введение

Одной из основных проблем теории автоматического управления динамическими объектами является проектирование алгоритмического обеспечения регулирующих устройств в условиях априорной неопределенности параметров математических моделей объектов и при наличии внешних неизмеряемых возмущений. В таких условиях проектируемая система управления должна обеспечивать выполнение основной цели управления, например, слежение за эталонным сигналом с требуемой точностью, что возможно осуществить, если скомпенсировать параметрическую неопределенность и внешние возмущения. Одним из основных подходов к решению этой задачи является использование робастных систем управления. Достаточно подробно эта проблема изложена в работе [1], где приводится классификация задач проектирования робастных систем управления и различных типов возмущений.

Особое место в этой проблеме занимают объекты, динамические процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями с последействием. В зависимости от типа последействия математические модели делятся на четыре основных класса: системы с запаздыванием по состоянию, управлению, нейтрального типа и с распределенным запаздыванием различных видов (т. е. оно тоже может быть по состоянию, управлению и нейтрального типа). Каждый из этих типов объектов требует своих методов и подходов для построения систем управления в условиях неопределенности.

В настоящее время имеется много публикаций по применению различных методов для управления объектами с последействием в условиях априорной неопределенности. В работе [2] синтезируется наблюдатель для нелинейного объекта с запаздыванием, а в работе [3] синтезируется алгоритм

адаптивной синхронизации для объекта с нестационарным дискретным и распределенным запаздыванием по состоянию. В статьях [4, 5] задача синхронизации решается с помощью адаптивного подхода, а в работе [6] — как обычная система с обратной связью. В статьях [7–9] решены задачи робастного управления для нелинейного объекта с запаздыванием по состоянию и для нейтрального типа соответственно. В работе [10] использование специальных фильтров позволило решить задачу робастной стабилизации для одного класса нелинейных объектов с запаздыванием. В работах [11, 12] решены задачи робастного управления для объектов с запаздыванием по состоянию и управлению. В данной статье результаты, полученные в статье [11], используются для построения алгоритма управления объектом с распределенным запаздыванием, когда неизвестен порядок математической модели.

1. Постановка задачи

Рассмотрим объект управления, математическая модель которого включает уравнение состояния и уравнение выхода:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + D \int_{-h}^0 y(t+\theta) d\theta + Bu(t) + \Gamma f(t), \\ x(\theta) &= \varphi(\theta), \theta \in [-h, 0], \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{1.1}$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния с неизвестной размерностью n ; $u(t)$, $y(t)$ — скалярные управляющее воздействие и регулируемая переменная; $f(t)$ — скалярное внешнее возмущение; $\varphi(\theta)$ — непрерывная начальная функция; h — время запаздывания; A , D , B , Γ , C — числовые матрицы соответствующих размерностей.

Требуется получить алгоритм управления, обеспечивающий выполнение целевого условия

$$|y(t) - y_M(t)| < \delta, \text{ при } t \geq T_0, \quad (1.2)$$

где величина $\delta > 0$ характеризует точность управления, T_0 — время, по истечении которого с начала функционирования системы должно выполняться целевое неравенство, $y_M(t)$ — задающее воздействие.

Будем решать сформулированную задачу при следующих ограничениях.

Д о п у щ е н и я.

1. Пара (A, B) — управляема, а пара (A, C) — наблюдаема.

2. Уравнение (1.1) является минимально-фазовым, т. е. квазиполином $C \text{Adj} \Lambda(s) B$ является гурвицевым, где s — комплексная переменная в преобразовании Лапласа, $\Lambda(s) = (Is - A - DC\sigma(s))$, I — единичная матрица, $\text{Adj} \Lambda(s)$ — присоединенная матрица (транспонированная матрица алгебраических дополнений матрицы $\Lambda(s)$),

$$\sigma(s) = \int_{-h}^0 e^{s\theta} d\theta = \frac{1 - e^{-hs}}{s}.$$

3. У передаточной функции по управлению $W(s) = C\Lambda^{-1}(s)B$ порядки квазиполиномов n и m знаменателя и числителя являются неизвестными величинами.

4. Известны величины: максимально возможные значения n и $\gamma = n - m$, которые обозначим символами $\bar{n}$, $\bar{\gamma}$, а также диапазоны возможных значений элементов матриц A , D , B , Γ , C . Высокочастотный коэффициент усиления передаточной функции по управлению может менять свой знак в процессе функционирования системы, но не чаще, чем длительность переходного процесса в замкнутой системе.

5. Внешнее возмущение $f(t)$ и задающее воздействие $y_M(t)$ являются гладкими ограниченными функциями.

6. Производные регулируемой переменной и управляющего воздействия не измеряются.

2. Метод решения

Преобразуем уравнение (1.1) в форму вход—выход и применим преобразования Лапласа:

$$(Q_1(s) - Q_2(s)\sigma(s))y(s) = (kR_1(s) + R_2(s)\sigma(s))u(s) + (S_1(s) + S_2(s)\sigma(s))f(s) + K(s), \quad (2.1)$$

где $y(s)$, $x(s)$, $u(s)$, $f(s)$ — изображение Лапласа функций $y(t)$, $x(t)$, $u(t)$, $f(t)$ соответственно; $K(s)$ — изображение Лапласа начальных условий;

$$Q_1(s) + Q_2(s)\sigma(s) = \det \Lambda(s),$$

$$kR_1(s) + R_2(s)\sigma(s) = C \text{Adj} \Lambda(s) B,$$

$$S_1(s) + S_2(s)\sigma(s) = C \text{Adj} \Lambda(s) \Gamma,$$

причем полиномы $Q_1(s)$, $R_1(s)$ являются нормированными, так что k — высокочастотный коэффициент усиления, а порядки полиномов

$$\deg Q_1(s) = n, \deg Q_2(s) \leq n - 1,$$

$$\deg R_1(s) = m, \deg R_2(s) \leq m - 1,$$

$$\deg S_1(s) \leq n - 1, \deg S_2(s) < \deg S_1(s).$$

Таким образом, передаточная функция по управлению имеет вид

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{kR_1(s) + R_2(s)\sigma(s)}{Q_1(s) + Q_2(s)\sigma(s)}.$$

Преобразуем уравнение (2.1). Воспользуемся следующим очевидным полиномиальным равенством:

$$Q_3(s)M(s) = Q_1(s)S_0(s) + N(s). \quad (2.2)$$

Здесь $\deg Q_3(s) = \bar{\gamma}$, $\deg M(s) = \bar{n} - 1$, $\deg S_0(s) = \bar{n} - m - 1$, $\deg N(s) = \bar{n} + \bar{\gamma} - 1$, полиномы $Q_3(s)$, $M(s)$ — нормированы, $Q_3(s)$, $M(s)$, $S_0(s)$ — гурвицевы. Так как $\deg Q_3(s)M(s) = \deg N(s)$, то всегда существует полином $N(s)$, обеспечивающий равенство (2.2) для любых полиномов $Q_3(s)$, $M(s)$, $Q_1(s)$, $S_0(s)$.

Умножим уравнение (2.2) на $y(s)$ и в первое слагаемое правой части подставим $y(s)$, определенное из уравнения (2.1):

$$y(s) = \frac{1}{Q_1(s)} (-Q_2(s)\sigma(s)y(s) + (kR_1(s) + R_2(s)\sigma(s))u(s) + (S_1(s) + S_2(s)\sigma(s))f(s) + K(s)),$$

в результате чего получим

$$\begin{aligned} Q_3(s)M(s)y(s) &= \\ &= S_0(s)(-Q_2(s)\sigma(s)y(s) + (kR_1(s) + R_2(s)\sigma(s))u(s) + \\ &+ (S_1(s) + S_2(s)\sigma(s))f(s) + K(s)) + N(s)y(s). \end{aligned}$$

Разделим полученное уравнение на полином $M(s)$ и выделим целые части в неправильных дробях:

$$\frac{S_0(s)kR_1(s)}{M(s)} = k + \frac{N_1(s)}{M(s)};$$

$$\frac{N(s)}{M(s)} = N_2(s) + \frac{N_3(s)}{M(s)};$$

$$\frac{S_0(s)Q_2(s)}{M(s)} = G_1(s) + \frac{G_2(s)}{M(s)}.$$

Здесь $\deg N_1(s) \leq \bar{n} - 2$, $\deg N_2(s) = \bar{\gamma}$, $\deg N_3(s) \leq \bar{n} - 2$, $\deg G_1(s) \leq \gamma - 1$.

Разложим многочлен $G_1(s)$ на сумму двух составляющих $G_1(s) = G_4(s) + G_3(s)$, где $\deg G_4(s) = \bar{\gamma} - 1$. Условия для выбора полиномов $Q_3(s)$ и $G_4(s)$ будут приведены в дальнейшем. Используя полученные разложения, получим

$$Q_3(s)y(s) = -G_4(s)\sigma(s)y(s) + ku(s) + \psi_1(s); \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \psi_1(s) &= -\left(G_3(s) + \frac{G_2(s)}{M(s)}\right)\sigma(s)y(s) + \\ &+ \frac{N_1(s) + S_0(s)R_2(s)\sigma(s)}{M(s)}u(s) + \left(N_2(s) + \frac{N_3(s)}{M(s)}\right)y(s) + \\ &+ \frac{S_0(s)(S_1(s) + S_2(s)\sigma(s))}{M(s)}f(s) + \frac{S_0(s)K(s)}{M(s)}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Таким образом, в результате выполненных преобразований в уравнении (2.3) получили уравнение с известными порядками полиномов и их коэффициентов. Вся неопределенность, связанная с неизвестным порядком уравнения (2.1), его пара-

метрами, а также с начальными условиями и внешними возмущениями содержится в оригинале функции $\psi_1(t)$.

Выполнив обратное преобразование Лапласа, получим уравнение

$$Q_3(P)y(t) + G_4(P) \int_{-h}^0 y(t + \theta) d\theta = ku(t) + \psi_1(t), \quad (2.5)$$

где $P = d/dt$ — оператор дифференцирования, $\psi_1(t)$ — оригинал изображения по Лапласу $\psi_1(s)$. Составим уравнение для ошибки $e(t) = y(t) - y_M(t)$:

$$Q_3(P)e(t) + G_4(P) \int_{-h}^0 e(t + \theta) d\theta = ku(t) + \psi_2(t); \quad (2.6)$$

$$\psi_2(t) = \psi_1(t) - Q_3(P)y_M(t) - G_4(P) \int_{-h}^0 y_M(t + \theta) d\theta. \quad (2.7)$$

Преобразуем уравнение (2.6) в векторно-матричную форму:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= A_1 \varepsilon(t) + D_1 \int_{-h}^0 \varepsilon(t + \theta) d\theta + B_0(ku(t) + \psi_2(t)); \\ e(t) &= C_0 \varepsilon(t), \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $\varepsilon \in \mathbb{R}^{\bar{\gamma}}$, $C_0 = [1, 0, \dots, 0]$,

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_{\bar{\gamma}} \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} q & I_{\bar{\gamma}-1} \\ 0 & I_{\bar{\gamma}-1} \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} -g_1 \\ \vdots \\ -g_{\bar{\gamma}} \end{bmatrix},$$

$0_{\bar{\gamma}-1}$ — нулевая матрица-строка; $g_1, \dots, g_{\bar{\gamma}}$ — коэффициенты полинома $G_4(s)$; $q_1, \dots, q_{\bar{\gamma}}$ — коэффициенты многочлена $Q_3(s)$; $I_{\bar{\gamma}-1}$ — единичная матрица порядка $(\bar{\gamma} - 1) \times (\bar{\gamma} - 1)$. Эти коэффициенты выбираются так, чтобы решением уравнения

$$HA_1 + A_1^T H + hHD_1 C_0 \Phi_0^{-1} C_0^T D_1^T H = -h\Phi_0 - \Lambda_0 \quad (2.9)$$

была положительно-определенная матрица H , а положительно-определенные матрицы Φ_0 и Λ_0 подбираются в процессе решения так, чтобы получить требуемый результат.

В этом случае уравнение (2.5) будет асимптотически устойчивым, если $\psi_2(t) = 0$.

Справедливость этого утверждения легко обосновать, если вычислить производную от функционала

$$V(t) = \varepsilon^T(t) H \varepsilon(t) + \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \varepsilon^T(\lambda) \Phi_0 \varepsilon(\lambda) d\lambda$$

на траекториях системы (2.6), положив $\psi_2(t) = 0$, $u(t) = 0$.

Сформируем управление в виде

$$u(t) = \alpha \phi(t) \vartheta(t), \quad \alpha > 0, \quad (2.10)$$

где $\vartheta(t)$ — новое управляющее воздействие, сигнал $\phi(t)$ служит для компенсации неопределенности знака коэффициента k .

Функции $\phi(t)$ формируются следующим образом [13]:

$$\phi(t) = \begin{cases} \phi(t - \tau), & \text{если } \text{sign } w(e(t - \tau)) \geq 0; \\ -\phi(t_0 - \tau), & t \in [t_0, t_0 + t_1], \\ \text{если } \text{sign } w(e(t - \tau)) < 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\phi(0) = 1,$$

где t_0 — время переключения, $w(e(t - \tau)) = 1 - \rho e^2(t - \tau)$, τ — время срабатывания триггера со счетным входом и с блокировкой входа на время t_1 после переключения, $\rho > 0$. Начальное условие $\phi(0) = 1$ соответствует тому, что знак высокочастотного коэффициента усиления k является положительным. Это соответствует отрицательной обратной связи.

Если в момент включения системы выполнено условие $\text{sign } w(e(0)) \geq 0$, то функция $\phi(t)$ не изменяется. Если в момент времени $t_0 - \tau$ выполняется условие $\text{sign } w(e(t_0 - \tau)) < 0$, то функция $\phi(t)$ изменяет свой знак на противоположный и сохраняет это значение на отрезке времени $[t_0, t_0 + t_1]$. В момент времени $t > t_0 + t_1$ блокировка снимается, и $\phi(t)$ определяется согласно алгоритму (2.9). Число ρ выбирается из условия $1 - \rho e^2(0) > 0$.

Если коэффициент k изменяет свой знак в процессе функционирования системы, то для уменьшения скачков ошибок желательно значение ρ уменьшить по истечении некоторого времени τ_1 и выбрать его из условия $1 - \rho e_{\text{доп}}^2 = 0$, где $e_{\text{доп}}$ является допустимой ошибкой при коррекции знака обратной связи. Таким образом, за исключением коротких промежутков времени, равных времени срабатывания корректирующего устройства, что происходит при изменении знака обратной связи, будет справедливо равенство

$$\phi(t) \text{sign } k = 1. \quad (2.12)$$

Поэтому смена знака равносильна действию на вход объекта импульсного возмущения.

В работе [13] предложена схема устройства коррекции обратной связи, которая приведена на рис. 1.

При включении системы в подсистеме, где обратная связь положительная, ошибка растет, и вели-

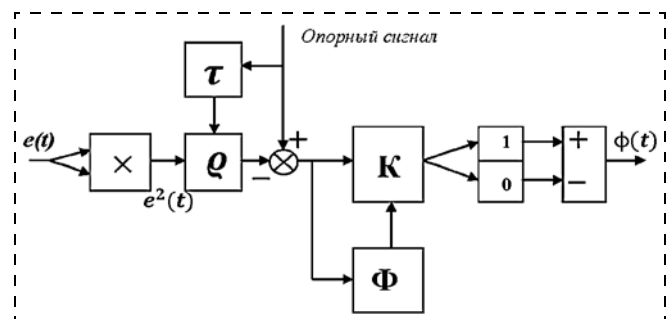


Рис. 1. Устройство коррекции знака обратной связи

чина $1 - \rho e^2(t)$ становится отрицательной. Открывается ключ **K**, и срабатывает триггер, а функция $\phi(e(t))$ меняет знак на противоположный. При этом запускается формирователь импульсов **Ф**. Через промежуток времени τ_1 сигналом с устройства τ устанавливается новое значение величины ρ . Это устройство срабатывает от опорного сигнала. Формирователь **Ф**, формирующий импульс длительностью t_1 , задним фронтом выключает ключ **K**, и все устройство устанавливается в режим ожидания, когда величина $1 - \rho e^2(t)$ станет отрицательной.

Для подавления возмущений необходимо выделить сигнал, несущий информацию о функции $\psi(t)$, так как в ней сконцентрирована вся априорная неопределенность параметров математической модели объекта управления и информация о внешних неконтролируемых возмущениях. Для этой цели введем вспомогательный контур, динамические процессы в котором описываются уравнением

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_b(t) &= A_1 \varepsilon_b(t) + D_1 \int_{-h}^0 e(t + \theta) d\theta + B_0 \beta \vartheta(t), \\ e_b(t) &= C_0 \varepsilon_b(t). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Составим уравнение для вектора рассогласования $z(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_b(t)$, подставив (2.10) в (2.8) и вычитая (2.13) из (2.8):

$$\dot{z}(t) = A_1 z(t) + B_0 \psi(t), \quad \zeta(t) = C_0 z(t). \quad (2.14)$$

Здесь $\psi(t) = \psi_2(t) + (k\phi(t)\alpha - \beta)\vartheta(t)$, $z \in \mathbb{R}^{\bar{\gamma}}$.

Принимая во внимание структуры матриц в уравнении (2.14), получим

$$\psi(t) = \dot{z}_{\bar{\gamma}}(t) + q_{\bar{\gamma}} \zeta(t), \quad (2.15)$$

где $z_{\bar{\gamma}}(t)$ — последняя компонента вектора $z(t)$. Поэтому идеальный закон управления описывается уравнением

$$\vartheta_u(t) = -\frac{1}{\beta} (\dot{z}_{\bar{\gamma}}(t) + q_{\bar{\gamma}} \zeta(t)). \quad (2.16)$$

Тогда уравнение замкнутой системы будет иметь вид

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_1 \varepsilon(t) + D_1 \int_{-h}^0 e(t + \theta) d\theta, \quad e(t) = C_0 \varepsilon(t). \quad (2.17)$$

Система будет асимптотически устойчивой. Однако в соответствии с шестым условием допущений алгоритм (2.16) не реализуем. Поэтому будем формировать управляющее воздействие в соответствии с формулой

$$\vartheta(t) = -\frac{1}{\beta} (\dot{\xi}_{\bar{\gamma}+1}(t) + q_{\bar{\gamma}} \zeta(t)). \quad (2.18)$$

Здесь $\xi_{\bar{\gamma}+1}(t)$ — последняя компонента вектора состояния наблюдателя $\xi(t)$ [14]:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= F_0 \xi(t) + a_m \zeta(t) + B_1 (\zeta(t) - \bar{\zeta}(t)), \\ \bar{\zeta}(t) &= C_0 \xi(t), \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\text{где } \xi \in \mathbb{R}^{\bar{\gamma}+1}, F_0 = \begin{bmatrix} 0_{(\bar{\gamma}+1) \times 1} & L_{\bar{\gamma}} \\ 0 \end{bmatrix}, B_1^T = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_{\bar{\gamma}+1} \\ \mu & \mu^2 & \dots & \mu^{\bar{\gamma}+1} \end{bmatrix},$$

$0_{(\bar{\gamma}+1) \times 1}$ — нулевой вектор-столбец.

Числа $b_1, \dots, b_{\bar{\gamma}+1}$ выбираются так, чтобы матрица $F = F_0 + B_2 C$ была гурвицевой, μ — малое положительное число, $a^T = [-q_1, \dots, -q_{\bar{\gamma}}, 0]$, $B_2^T = [b_1, \dots, b_{\bar{\gamma}+1}]$, $\bar{\zeta}(t)$ — оценка сигнала $\zeta(t)$.

Следует отметить, что порядок вектора $\xi(t)$ на единицу больше, чем это необходимо при технической реализации, что сделано для удобства аналитических преобразований. Поэтому введем новую переменную $z_{\bar{\gamma}+1}(t) = \psi(t) - q_{\bar{\gamma}} \zeta(t)$ и вектор $\bar{z}^T(t) = [z^T(t), z_{\bar{\gamma}+1}(t)]$. Тогда уравнение (2.14) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{\bar{z}}(t) &= F_0 \bar{z}(t) + \bar{a} \zeta(t) + B_0 (\psi(t) - q_{\bar{\gamma}} \dot{\zeta}(t)), \\ \zeta(t) &= C_0 \bar{z}(t). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Здесь $\bar{a}^T = [-q_1, \dots, -q_{\bar{\gamma}-1}, 0, 0]$. Вектор $\xi(t)$ является оценкой вектора $\bar{z}(t)$. Введем вектор нормированных отклонений $\eta(t) = \Gamma^{-1}(\bar{z}(t) - \xi(t))$, где $\Gamma = \text{diag}\{\mu^{\bar{\gamma}}, \dots, \mu, 1\}$. Вычитая (2.19) из (2.20), получим уравнение для нормированных отклонений $\eta(t)$:

$$\dot{\eta}(t) = \frac{1}{\mu} F \eta(t) + B_0 (\psi(t) - q_{\bar{\gamma}} \dot{\zeta}(t)). \quad (2.21)$$

Утверждение. Пусть выполнены условия допущений, и матрицы A_1 и D_1 выбраны так, что справедливо уравнение (2.9). Тогда существует число $\mu_0 > 0$ такое, что при выполнении неравенства $\mu_0 > \mu$ для системы (1.1), (2.10), (2.11), (2.13), (2.19) выполнено целевое условие (1.2).

Доказательство приведено в приложении.

Для иллюстрации работоспособности полученного алгоритма управления рассмотрим числовой пример.

Пример. Рассмотрим объект управления, математическая модель которого описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & 1 & 0 \\ a_3 & 0 & 0 & 1 \\ a_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} \int_{-h}^0 y(t + \theta) d\theta + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} f(t), \\ y(t) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0] x(t); \\ x(\theta) &= 0, \theta \in [-4, 0]. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Класс неопределенности задан неравенствами:

$$\begin{aligned} -3 \leq a_i \leq 3, -2 \leq c_i \leq 2, i = \overline{1, 4}; \\ -4 \leq d_1 < -1, -4 \leq d_2 \leq 2, \\ -4 \leq d_3 \leq 2, -4 \leq d_4 \leq 1, \\ |f(t)| \leq 5, 0 \leq b_1 \leq 2, \\ 0 \leq b_2 \leq 3, 4 \leq b_3 \leq 5. \end{aligned}$$

В данном случае b_1 и b_2 могут быть нулевыми. Поэтому относительная степень передаточной функции $\gamma = n - m$ неизвестна. Известно ее максимальное значение $\bar{\gamma} = 4$.

Вводится новое управляющее воздействие $\vartheta(t)$:

$$u(t) = \alpha \phi(t) \vartheta(t).$$

где функция $\phi(t)$ формируется в соответствии с формулой (2.11), в которой начальное значение $\rho = 100$, а через три секунды оно становится равным 200, $t_1 = 12$ с.

Уравнение вспомогательного контура (2.13) возьмем в виде

$$\dot{\varepsilon}_b(t) \begin{bmatrix} -11 & 1 & 0 & 0 \\ -40 & 0 & 1 & 0 \\ -68 & 0 & 0 & 1 \\ -50 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \varepsilon_b(t) + \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ -1 \\ -2 \end{bmatrix} \int_{-h}^0 e(t + \theta) d\theta + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \beta \vartheta(t);$$

$$e_b(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \varepsilon_b(t),$$

где $e(t) = y(t) - y_m(t)$. Проверим справедливость матричного уравнения (2.9). Возьмем диагональные матрицы $\Phi_0 = \text{diag}\{300 \ 0,1 \dots 0,1\}$, $\Lambda_0 = 0,1\Phi_0$. Тогда решением уравнения (2.9) с точностью до третьего знака является следующая матрица:

$$H = \begin{bmatrix} 137,358 & -0,299 & -6,878 & 1,421 \\ -0,299 & 7,598 & -1,592 & -0,83 \\ -6,878 & -1,592 & 1,488 & -0,283 \\ 1,421 & -0,83 & -0,283 & 0,845 \end{bmatrix}.$$

Уравнения наблюдателя (2.19) имеют вид

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1(t) = \xi_2(t) - 11\zeta(t) + \frac{5}{\mu}(\zeta(t) - \xi_1(t)); \\ \dot{\xi}_2(t) = \xi_3(t) - 40\zeta(t) + \frac{5}{2}(\zeta(t) - \xi_1(t)); \\ \dot{\xi}_3(t) = \xi_4(t) - 68\zeta(t) + \frac{8}{3}(\zeta(t) - \xi_1(t)); \\ \dot{\xi}_4(t) = -50\zeta(t) + \frac{8}{4}(\zeta(t) - \xi_1(t)) \\ \zeta(t) = e(t) - e_b(t). \end{cases}$$

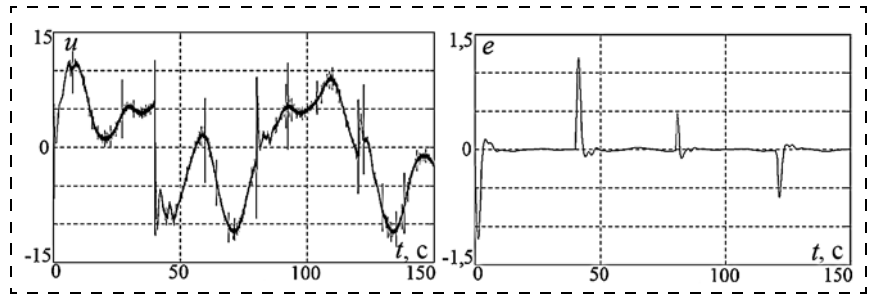


Рис. 2. Переходные процессы по управлению и ошибке: $b_1 = 1, b_2 = 3, b_3 = 5, \gamma = 2$

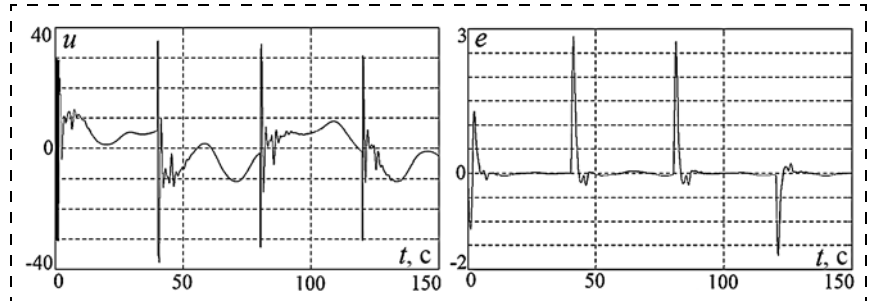


Рис. 3. Переходные процессы по управлению и ошибке: $b_1 = 0, b_2 = 1, b_3 = 5, \gamma = 3$

Управляющее воздействие $\vartheta(t)$ будем формировать в соответствии с формулой

$$\vartheta(t) = -\frac{1}{\beta}(\lambda(\dot{\xi}_4(t)) + 50\zeta(t)).$$

Здесь $\lambda(\dot{\xi}_4(t))$ — нелинейная функция с насыщением, которая вводится для ограничения управляющего воздействия в момент включения системы в работу. Как отмечает автор, которым был предложен такой наблюдатель [14], в момент включения выходные сигналы наблюдателя могут быть очень большими. Поэтому в работе [14] рекомендуется ввести ограничение на управляющее воздействие. В данном случае используется только один сигнал с наблюдателя, на который и введено ограничение:

$$\lambda(\dot{\xi}_4(t)) = \begin{cases} \dot{\xi}_4(t), & \text{если } |\dot{\xi}_4(t)| < \chi; \\ \chi, & \text{если } \dot{\xi}_4(t) \geq \chi, \chi > 0; \\ -\chi, & \text{если } \dot{\xi}_4(t) \leq -\chi. \end{cases}$$

На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования при следующих исходных данных: $a_1 = -2, a_2 = 3, a_3 = a_4 = 2, d_1 = -2, d_2 = d_3 = 2, d_4 = 1, h = 4$ с, $a = 0,2, \beta = 10, f(t) = 2\sin 0,2t + 3\sin 0,7t, y_m(t) = 3\sin 0,2t + 3\sin 0,3t, \chi = 100, \mu = 0,01$. Все начальные условия нулевые.

Начальное значение высокочастотного коэффициента усиления равно -1 , т. е. обратная связь положительная. Через каждые 40 с его знак меняется на противоположный. Для любых параметров из заданного класса неопределенности значение ошибки после окончания переходного процесса не превышает 0,05. Если начальные условия не нуле-

вые, например $x(\theta) = 1$, $\theta \in [-4, 0]$, то необходимо начальное значение коэффициента ρ взять равным трем. В переходных процессах по ошибке увеличится амплитуда первого импульса. Таким образом, алгоритм управления, полученный для $\bar{\gamma} = 4$, работоспособен при других значениях γ .

Закключение

Решена задача робастного управления для объекта, математической моделью которого является линейное уравнение с распределенным запаздыванием. При этом коэффициенты уравнения и его порядок являются неизвестными. Кроме того высокочастотный коэффициент усиления может изменять свой знак в процессе функционирования системы. Результаты моделирования показывают, что предложенный алгоритм управления позволяет получить качественные переходные процессы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для доказательства утверждения докажем лемму, которая является аналогом леммы [15], справедливой для систем без запаздывания.

Л е м м а. Пусть математическая модель системы имеет вид

$$\dot{x}(t) = f(x_t(\theta), \mu_1, \mu_2), x(\theta) = \varphi(\theta), \theta \in [-h, 0], \quad (\text{П.1})$$

где $x \in \mathbb{R}^n$, $\mu_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$, $\mu_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$, $x_t(\theta) = x(t + \theta)$, $x_t(\theta) \in C[-h, 0]$; $C[-h, 0]$ — банахово пространство непрерывных функций на отрезке $[-h, 0]$; $\varphi(\theta)$ — непрерывная начальная функция; $f(x_t(\theta), \mu_1, \mu_2)$ — непрерывное отображение из $\mathbb{R}^{n_1+n_2} \times [-h, 0] \times \mathbb{R}^n$ в $\mathbb{R}^n$, липшицево по $x_t(\theta)$. Пусть система (П. 1) имеет ограниченную область диссипативности

$$D = \{x_t(\theta) : \|V(x_t(\theta))\| \leq C\}.$$

где $V(x_t(\theta)) = V_1(x(t)) + V_2(x_t(\theta))$ — непрерывный положительно-определенный функционал на $C[-h, 0]$,

$$|V(x_t(\theta))| = \sup_{-h \leq \theta \leq 0} |V(x_t(\theta))|;$$

$V_1(x(t))$ — непрерывная положительно определенная функция; $V_2(x_t(\theta))$ — функциональная часть функционала $V(x_t(\theta))$. Предположим, что для некоторых значений $\theta_1 > 0$, $\varepsilon > 0$ при $\mu_2 = 0$ выполнено условие

$$\sup_{|\mu_1| < \theta_1} \left(\left(\frac{\partial V_1(x(t))}{\partial x} \right)^T f(x_t(\theta), \mu_1, 0) + \frac{\partial V_2(x_t(\theta))}{\partial t} \right) \leq -\varepsilon, \quad (\text{П.2})$$

когда $\|V(x_t(\theta))\| = C$. Тогда для достаточно малых значений $\theta > 0$, таких что $|\mu_2| \leq \theta$, область диссипа-

тивности $D = \{x_t(\theta) : \|V(x_t(\theta))\| \leq C\}$ остается областью диссипативности системы (П.1).

Доказательство леммы. Введем обозначение

$$\Phi(\mu_2) = \sup_{|\mu_1| < \theta_1} \left(\left(\frac{\partial V_1(x(t))}{\partial x} \right)^T f(x_t(\theta), \mu_1, \mu_2) + \frac{\partial V_2(x_t(\theta))}{\partial t} \right)$$

при $\|V(x_t(\theta))\| = C$. В силу того, что функционал $V(x_t(\theta))$ и отображение $f(x_t(\theta), \mu_1, \mu_2)$ непрерывны по μ_2 , функция $\Phi(\mu_2)$ будет непрерывной по μ_2 . Так как выполнено условие (П.2), т. е. $\Phi(0) < -\varepsilon$, то будет существовать $\theta > 0$, такое, что при выполнении неравенства $|\mu_2| \leq \theta$ будет выполнено условие $\Phi(\mu_2) < 0$. Это означает, что область диссипативности остается прежней.

Доказательство утверждения. Подставим значение $\vartheta(t)$ из (2.18) в формулы (2.6) и (2.13) и из уравнений (2.8), (2.13), (2.14), (2.18), (2.19), (2.21) получим

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= A_1 \varepsilon(t) + D_1 C_0 \int_{-h}^0 \varepsilon(t + \theta) d\theta + B_0 C_{\bar{\gamma}+1} \eta(t), \\ e(t) &= C_0 \varepsilon(t); \end{aligned} \quad (\text{П.3})$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_b(t) &= A_1 \varepsilon_b(t) + D_1 C_0 \int_{-h}^0 \varepsilon(t + \theta) d\theta - B_0 (\xi_{\bar{\gamma}+1}(t) + q_{\bar{\gamma}} \zeta(t)), \\ e_b(t) &= C_0 \varepsilon_b(t); \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= F_0 \xi(t) + a_m \zeta(t) + B_1 (\zeta(t) - \bar{\zeta}(t)); \\ \bar{\zeta}(t) &= C_0 \xi(t), \zeta(t) = e(t) - e_b(t); \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

$$\dot{z}(t) = A_1 z(t) + B_0 \psi(t), \zeta(t) = C_0 z(t); \quad (\text{П.6})$$

$$\begin{aligned} \mu_1 \dot{\eta}(t) &= F \eta(t) + \mu_2 B_0 (\dot{\psi}(t) - q_{\bar{\gamma}} \dot{\zeta}(t)), \\ \zeta(t) - \bar{\zeta}(t) &= C_0 T \eta(t), \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

где $C_{\bar{\gamma}+1} = [0, \dots, 0, 1]$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$.

Пусть внешние воздействия $y_M(t) = 0$, $f(t) = 0$. Тогда, принимая во внимание выражения (2.4), (2.7) и формулу $\psi(t) = \psi_2(t) + (k\phi(t)\alpha - \beta)\vartheta(t)$, получим

$$\psi(t) = \bar{\psi}_1(t) + (k\phi(t)\alpha - \beta)\vartheta(t),$$

где $\bar{\psi}_1(t)$ получается из соотношения (2.4) с учетом (2.7), когда $y_M(t) = 0$, $f(t) = 0$. Здесь

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_1(s) &= - \left(G_3(s) + \frac{G_2(s)}{M(s)} \right) \sigma(s) y(s) + \\ &+ \frac{N_1(s) + S_0(s) R_2(s) \sigma(s)}{M(s)} u(s) + \\ &+ \left(N_2(s) + \frac{N_3(s)}{M(s)} \right) y(s) + \frac{S_0(s) K(s)}{M(s)}. \end{aligned}$$

В этом случае система (П. 3)—(П. 7) автономна, и к ней применима лемма. Пусть $\mu_2 = 0$. Возьмем функционал Ляпунова—Красовского

$$V(t) = \varepsilon^T(t) H \varepsilon(t) + \eta^T(t) H_1 \eta(t) + \int_{-h}^0 \int_t^{\theta} \varepsilon^T(\lambda) \Phi_0 \varepsilon(\lambda) d\lambda, \quad (\text{П.8})$$

где положительно определенные матрицы H , Φ_0 удовлетворяют уравнению (2.9), а H_1 является решением уравнения

$$H_1 F + F^T H_1 = -\rho_1 I, \quad \rho_1 > 0. \quad (\text{П.9})$$

Вычислим производную от функционала (П.8) на траекториях системы (П.3), (П.7):

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \varepsilon^T(t) (H A_1 + A_1^T H) \varepsilon(t) + 2\varepsilon^T(t) \times \\ & \times \int_{-h}^0 (H D_1 C_0 \int \varepsilon(t + \theta) d\theta + B_0 C_{\gamma+1} \eta(t)) + \\ & + \eta^T(t) \frac{1}{\mu_1} (H_1 F + F^T H_1) \eta(t) + h \varepsilon^T(t) \Phi_0 \varepsilon(t) - \\ & - \int_{-h}^0 \varepsilon^T(t + \theta) \Phi_0 \varepsilon(t + \theta) d\theta. \end{aligned}$$

Воспользуемся равенством и оценкой

$$\begin{aligned} 2\varepsilon^T(t) H D_1 C_0 \int_{-h}^0 \varepsilon(t + \theta) d\theta - \int_{-h}^0 \varepsilon^T(t + \theta) \Phi_0 \varepsilon(t + \theta) d\theta = \\ = h \varepsilon^T(t) H D_1 C_0 \Phi_0^{-1} C_0^T D_1^T H \varepsilon(t) - \int_{-h}^0 (\varepsilon^T(t) H D_1 C_0 \Phi_0^{-1} - \\ - \varepsilon^T(t + \theta)) \Phi_0 (\Phi_0^{-1} C_0^T D_1^T H \varepsilon(t) - \varepsilon(t + \theta)) d\theta, \\ 2\varepsilon^T(t) H B_0 C_{\gamma+1} \eta(t) \leq \mu_1 |\varepsilon(t)|^2 + \frac{|H B_0|^2}{\mu_1} |\eta(t)|^2. \end{aligned}$$

Подставив эти оценки в формулу для производной от функционала, получим

$$\begin{aligned} V(\dot{t}) \leq & \varepsilon^T(t) (H A_1 + A_1^T H + \\ & + h H D_1 C_0 \Phi_0^{-1} C_0^T D_1^T H + h \Phi_0) \varepsilon(t) + \\ & + \eta^T(t) \frac{1}{\mu_1} (H_1 F + F^T H_1) \eta(t) + \mu_1 |\varepsilon(t)|^2 + \frac{|H B_0|^2}{\mu_1} |\eta(t)|^2. \end{aligned}$$

Принимая во внимание соотношения (2.9) и (П. 9), получим следующее неравенство:

$$\dot{V}(t) \leq -(\rho - \mu_1) |\varepsilon(t)|^2 - \frac{\rho_1 - |H B_0|^2}{\mu_1} |\eta(t)|^2,$$

где $\rho = s_{\min}(\Lambda_0)$, $s_{\min}(\Lambda_0)$ — минимальное собственное число матрицы Λ_0 . Если выбрать ρ_1 и μ_1 из условий: $\rho - \mu_1 > 0$, $\rho_1 - |H B_0|^2 > 0$, то получим, что система (П. 3), (П. 7) асимптотически устойчива по

переменным $\varepsilon(t)$, $\eta(t)$. Так как $y_m(t) = f(t) = 0$, то $y(t)$ и ее производные стремятся к нулю при $t \rightarrow \infty$. Следовательно, и переменная $\bar{\psi}_1(t)$ и ее производная стремятся к нулю. Тогда из соотношений (2.15) и (2.18) имеем

$$\vartheta(t) = -\frac{1}{\beta} (\xi_{\gamma+1}(t) + q_{\gamma} \zeta(t)) = -\frac{1}{\beta} (\psi(t) - C_{\gamma+1} \eta(t)).$$

Подставим в эту формулу значение $\psi(t)$, принимая во внимание, что $y_m(t) = f(t) = 0$, в результате чего получим

$$\vartheta(t) = -\frac{1}{\beta} (\bar{\psi}_1(t) + (k\phi(t)\alpha - \beta)\vartheta(t) - C_{\gamma+1} \eta(t)).$$

Разрешим это уравнение:

$$\vartheta(t) = -\frac{1}{k\phi(t)\alpha} (\bar{\psi}_1(t) - C_{\gamma+1} \eta(t)),$$

откуда следует

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta(t) = 0,$$

а из выражения (2.10)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = 0.$$

Тогда из соотношений (П.4) имеем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_b(t) = 0,$$

а из соотношений (П.5) следует

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \xi(t) = 0.$$

Следовательно, система (П.3)—(П.7) является асимптотически устойчивой, если $y_m(t) = f(t) = 0$ и $\mu_2 = 0$. Условия леммы выполнены. Следовательно, существует $\mu_0 > 0$ такая, что система (П.3)—(П.7) будет диссипативной, если $\mu_2 < \mu_0$.

Если на вход диссипативной линейной системы подать ограниченные входные воздействия, то система останется диссипативной, а значит, все переменные в ней будут ограниченными.

Остается выяснить, существует ли $\mu_0 > 0$, обеспечивающая выполнение целевого условия, когда внешние воздействия $y_m(t)$, $f(t)$ удовлетворяют четвертому условию предположений.

Возьмем функционал (П.8) и вычислим производную на траекториях системы (П. 3), (П. 7), принимая во внимание равенство $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \varepsilon^T(t) (H A_1 + A_1^T H) \varepsilon(t) + \\ & + 2\varepsilon^T(t) \left(H D_1 C_0 \int_{-h}^0 \varepsilon(t + \theta) d\theta + B_0 C_{\gamma+1} \eta(t) \right) + \\ & + \eta^T(t) \frac{1}{\mu_0} (H_1 F + F^T H_1) \eta(t) + h \varepsilon^T(t) \Phi_0 \varepsilon(t) - \\ & - \int_{-h}^0 \varepsilon^T(t + \theta) \Phi_0 \varepsilon(t + \theta) d\theta + 2\eta^T(t) H_1 B_0 (\dot{\psi}(t) - q_{\gamma} \dot{\zeta}(t)). \end{aligned}$$

Воспользуемся уже приведенными оценками и неравенством

$$2\eta^T(t)H_1B_0(\dot{\psi}(t) - q_{\bar{\gamma}}\dot{\zeta}(t)) \leq \frac{1}{\mu_0}|\eta(t)|^2 + \mu_0\delta_1,$$

$$\delta_1 = \sup_t |H_1B_0(\dot{\psi}(t) - q_{\bar{\gamma}}\dot{\zeta}(t))|^2.$$

Тогда, принимая во внимание (2.9) и (П.9), получим

$$\dot{V}(t) \leq -(\rho - \mu_0)|\varepsilon(t)|^2 - \frac{\rho_1 - 1 - |HB_0|^2}{\mu_0}|\eta(t)|^2 + \mu_0\delta_1.$$

Если выбрать ρ_1 и μ_0 из условий: $\rho - \mu_0 = -\rho_2$, $\rho_2 > 0$, $\rho_1 - 1 - |HB_0|^2 = -\rho_3$, $\rho_3 > 0$, $\rho = s_{\min}(\Lambda)$, то получим неравенство

$$\dot{V}(t) \leq -\rho_2|\varepsilon(t)|^2 - \rho_3|\eta(t)|^2 + \mu_0\delta_1,$$

откуда следует оценка

$$|e(t)| \leq |\varepsilon(t)| \leq \sqrt{\frac{\mu_0\delta_1}{\rho_2}}.$$

Из этой оценки видно, что выбором числа μ_0 достигается требуемое значение ошибки в целевом условии. При этом это значение будет достигнуто за конечный промежуток времени.

Список литературы

1. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
2. Hassan L., Zemouche A., Boutayeb M. H_∞ Unknown input observers design for a class of nonlinear time-delay systems // Preprints of 18th IFAC Word Congress. 2011. P. 3879–3884.
3. Karimi H. R. Robust adaptive H_∞ synchronization of master-slave systems with discrete and distributed time-varying delays and nonlinear perturbations // Preprints of 18th IFAC Word Congress. 2011. P. 302–307.
4. Gao H., Lam J., Chen G. New criteria for synchronization stability of general complex dynamical networks with coupling delay // Physics letters. 2006. V. 360, N. 2. P. 263–273.
5. Ge S. S., Hong F., Lee T. H. Adaptive neural network control of nonlinear systems with unknown time delays // IEEE Trans. Automat. Contr. 2003. V. 48, N. 11. P. 2004–2010.
6. Gao H., Chen G., Lam J. A new delay systems approach to network-based control // Automatica. 2008. V. 44, N. 1. P. 39–52.
7. Nguang S. K. Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems. // IEEE Trans. Automat. Contr. 2000. V. 45, N. 4. P. 756–762.
8. Han Q. L. Robust stability of uncertain delay-differential systems of neutral type // Automatica. 2002. V. 38, N. 4. P. 719–723.
9. Ionescu D., Niculescu S. I., Dugard L., Dion J. M. Verriest E. I. On delay dependent stability of neutral systems // Automatica. 2003. V. 39, N. 2. P. 255–261.
10. Бобцов А. А. Стабилизация нелинейных систем по выходу в условиях запаздывания // Изв. РАН. ТиСУ. 2005. № 3. С. 5–11.
11. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // А и Т. 2007. № 7. С. 103–115.
12. Цыкунов А. М. Робастное управление с компенсацией возмущений. М.: Физматлит. 2012.
13. Цыкунов А. М. Децентрализованное робастное управление многосвязными структурно неопределенными объектами // А и Т. № 12. 2010. С. 111–121.
14. Khalil H. K. Nonlinear systems. 2nd ed. N. Y.: Prentice-Hall, 1996.
15. Брусин В. А. Об одном классе сингулярно-возмущенных адаптивных систем // А и Т. 1995. № 4. С. 119–127.

Robust Control of Object with Distributed Delay and Unknown Order of Mathematical Model

A. M. Tsykunov, tsygunov_al@mail.ru✉,
Astrakhan, 414056, Astrakhan State Technical University

Corresponding author: Tsykunov Aleksandr M., D. Sc., Head of the Department " Mathematic",
Astrakhan, 414056, Astrakhan State Technical University,
e-mail: tsygunov_al@mail.ru

Received on September 22, 2015

Accepted on October 01, 2015

The object which mathematical model is the vector equation with the distributed delay on a state vector investigated. It is supposed, that parameters and order of mathematical model are unknown. On object not measured limited disturbance operated. The problem of tracing a reference signal is formulated. To provide qualitative tracking a reference signal, it is necessary to compensate influence of not measured disturbance on the output variable. For the decision of this problem, the method of an auxiliary contour is used. This method has well proved at designing sensible control for systems without delay. In this paper, this method was used for systems with the distributed delay. The problem robust control of objects with the distributed delay on a state vector was solved. It is suppose, that parameters and order of mathematical model of object are unknown, and output variable are accessible to measurement only. As target conditions accuracy of tracking of a reference signal is accepted. The algorithm of the control was received allowing compensating aprioristic uncertainty and it is essential to reduce influence not measured the bounded external limited disturbance to output. The equations of the closed system are singular the system of equations. In this paper is prove, that the received algorithm of control provides performance of target conditions. Numerical examples and results of computer simulation, which have shown efficiency of the receive algorithm of tracking.

Keywords: distributed delay, robust control, target condition, functional, reference signal, singular the system of equations

For citation:

Tsykunov A. M. Robust Control of Object with Distributed Delay and Unknown Order of Mathematical Model, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 219–227.

DOI: 10.17587/mau/17.219-227

References

1. **Polyak B. T., Sherbakov P. S.** *Robustnaja ustojichivost i upravlenie* (Robust stability and control), Moscow, Nauka, 2001 (in Russian).
2. **Hassan L., Zemouche A., Boutayeb M.** H_∞ Unknown input observers design for a class of nonlinear time-delay systems, *Preprints of 18th IFAC Word Congress*, 2011, pp. 3879–3884.
3. **Karimi H. R.** Robust adaptive H_∞ synchronization of master-slave systems with discrete and distributed time-varying delays and nonlinear perturbations, *Preprints of 18th IFAC Word Congress*, 2011, pp. 302–307.
4. **Gao H., Lam J., Chen G.** New criteria for synchronization stability of general complex dynamical networks with coupling delay, *Physics Letters*, 2006, vol. 36, no. 2, pp. 263–273.
5. **Ge S. S., Hong F., Lee T. H.** Adaptive neural network control of nonlinear systems with unknown time delays, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2003, vol. 48, no. 11, pp. 2004–2010.

6. **Gao H., Chen G., Lam J.** A new delay systems approach to network-based control, *Automatica*, 2008, vol. 44, no. 1, pp. 39–52.
7. **Nguang S. K.** Robust stabilization of a class of time-delay nonlinear systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2000, vol. 45, no. 4, pp. 756–762.
8. **Han Q. L.** Robust stability of uncertain delay-differential systems of neutral type, *Automatica*, 2002, vol. 38, no. 4, pp. 719–723.
9. **Ivanescu D., Niculescu S. I., Dugard L., Dion J. M., Verriest E. I.** On delay dependent stability of neutral systems, *Automatica*, 2003, vol. 39, no. 2, pp. 255–261.
10. **Bobtsov A. A.** Output stabilization of nonlinear systems under delay conditions, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, vol. 47, no. 2, pp. 179–186.
11. **Tsykunov A. M.** Robust control algorithms with compensation of bounded perturbations, *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, no. 7, pp. 1201–1212.
12. **Tsykunov A. M.** *Robustnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushenii* (Robust control with compensation of perturbations), Moscow, Fizmatlit, 2012 (in Russian).
13. **Tsykunov A. M.** Decentralized robust control for multiconnected objects with structural uncertainty, *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 12, pp. 111–121.
14. **Khalil H. K.** *Nonlinear systems*, 2nd ed., N. Y., Prentice-Hall, 1996.
15. **Brusin V. A.** On a class of singularly disturbed adaptive systems, *Automation and Remote Control*, 1995, vol. 56, no. 4, pp. 119–127.

УДК 681.51

DOI: 10.17587/mau.17.227-232

Г. Д. Афанасьев, канд. техн. наук, доц., nauka-pf@yandex.ru,

И. Г. Афанасьева, аспирант, ira.afanaseva.70@mail.ru,

Северо-Кавказский федеральный университет (филиал в г. Пятигорске)

Расчет параметров распределенных систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством

Рассмотрен метод расчета параметров систем автоматического регулирования с обеспечивающим астатизм параллельным корректирующим устройством для объекта с распределенными параметрами, переходная характеристика которого аппроксимируется экспонентой второго порядка с запаздыванием. Методом математического моделирования продемонстрирована возможность получения высоких показателей качества регулирования при использовании систем рассматриваемого типа для объектов с распределенными параметрами.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, объект с запаздыванием, параллельное корректирующее устройство, переходный процесс, аperiodическое звено первого порядка, объект регулирования, передаточная функция, объект с распределенными параметрами, усилительное звено, кривые переходных

Введение

Для обеспечения высоких показателей качества регулирования процессов в системах, имеющих объекты с распределенными параметрами, обычно применяют высокоточные регуляторы, включаемые последовательно с неизменяемой частью системы и реализующие пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования. Для расчета параметров настройки регуляторов обычно применяют частотные методы, в которых задаются запасы устойчивости по модулю и по фазе, гарантирующие устойчивость систем, но напрямую не связанные с показателями качества регулирования [1].

Постановка задачи

В данной работе сделана попытка обосновать возможность применения согласно-параллельной

коррекции (СПК) для получения высоких показателей качества регулирования в системах, имеющих объекты с распределенными параметрами. Как справедливо отмечено авторами работы [2], в классической и современной литературе по теории автоматического регулирования использование СПК, как правило, остается за гранью внимания. В названной работе изложены три варианта использования СПК, позволяющие получить высокие показатели качества регулирования в системах управления линейными стационарными объектами с различными динамическими характеристиками. В работах [3–9] рассмотрены вопросы исследования динамики и расчета параметров систем автоматического регулирования (САР) с СПК для случаев различных объектов с запаздыванием, в том числе и с распределенными параметрами. Особенностью этих САР является то, что порядок их инерционно-

сти при соответствующем выборе типов и параметров корректирующих устройств остается равным порядку инерционности объекта регулирования, что, как правило, улучшает динамические показатели регулирования. В данной работе для расчета параметров систем использованы корневые методы [10, 11], напрямую связанные с основными показателями качества регулирования.

Метод решения задачи исследования

Структурная схема САР с параллельным корректирующим устройством, включающая объект с распределенными параметрами, представлена на рис. 1.

Операторное уравнение, соответствующее изобразительной структурной схеме, имеет вид [3]

[1 + K1W0(s)kOC - WK(s)kOC]Ṫ(s) = K1W0(s)F3(s) + [kOCWK(s)WB(s) - WB(s)]FB(s), (1)

где W0(s) и WB(s) — передаточные функции объекта регулирования по управляющему и возмущающему воздействиям соответственно; FB — возмущающее воздействие; F3 — задающее воздействие; WK(s) — передаточная функция корректирующего устройства;

K1 = E1[n1-1/n1 + 1/n1Gi] — передаточный коэффициент



Рис. 1. Структурная схема САР с параллельным корректирующим устройством

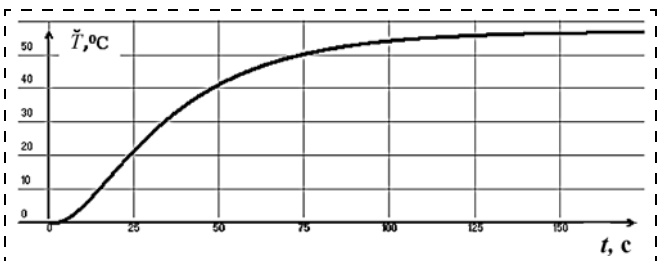


Рис. 2. Переходная характеристика пластины

Таблица 1

Параметры	Моды	
	Первая	Третья
Передаточный коэффициент	0,0568	0,0432
Постоянная времени T1	29,1	27,0
Постоянная времени T2	9,25	9,0
Запаздывание τ	2	2

ент пропорционального распределенного звена [1] (E1 — коэффициент усиления, n1 — весовой коэффициент, Gi — обобщенная координата, соответствующая i-й моде [12]); kOC — коэффициент звена обратной связи, которое во всех случаях принимается безынерционным усилительным.

При выполнении условия kкkOC = 1, где kк — передаточный коэффициент пропорциональной части корректирующего устройства, в системе обеспечивается астатизм, в установившемся режиме регулируемая величина Ṫ = F3/kOC не зависит от возмущающего воздействия [6].

Для иллюстрации метода расчета систем рассматриваемого типа в качестве объекта регулирования с распределенными параметрами выбрана стальная пластина, имеющая размеры XL = 0,6, YL = 0,6, ZL = 0,03 (все параметры и переменные здесь и в дальнейшем указаны в СИ), на поверхность которой (X = 0, Y = 0, Z = ZL) направлен тепловой поток U(X, Y, t), являющийся управляющим воздействием. В качестве регулируемой величины принята температура Ṫ(X', Y', Z', t) в средней зоне пластины. Граничные и начальные условия приняты нулевыми. Математическая модель объекта имеет вид [1, 13]

∂Ṫ(X, Y, Z, t) / ∂t = a [∂²Ṫ(X, Y, Z, t) / ∂X² + ∂²Ṫ(X, Y, Z, t) / ∂Y² + ∂²Ṫ(X, Y, Z, t) / ∂Z²]; (2)

λ ∂Ṫ(X, Y, Z, t) / ∂Z = U(X, Y, t); (3)

где a = 0,000019 и λ = 0,23 приняты для стали [14].

Переходная характеристика пластины, полученная математическим моделированием, представлена на рис. 2.

Для выполнения расчета параметров системы кривая аппроксимирована апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием. Передаточная функция по управляющему воздействию при этом имеет вид

W0(s) = (k0e⁻ˢᵀ) / ((T1s + 1)(T2s + 1)). (4)

Для 1-й и 3-й мод входного воздействия полученные методом площадей Симою [15] параметры представлены в табл. 1.

Выбор типа корректирующего устройства и расчет его параметров проводили исходя из требования получить апериодический переходный процесс при минимальном времени регулирования. Для того чтобы порядок инерционности системы был равен порядку инерционности объекта регулирования, знаменатель передаточной функции корректирующего устройства необходимо принять та-

Параметры	Моды											
	Первая по X и Y						Первая по X и третья по Y					
k_d	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
k	1,19	1,83	2,58	3,42	4,35	5,36	1,16	1,82	2,60	3,48	4,53	5,51
K_1	21	32,2	45,4	60,2	76,6	94,4	26,7	42,1	60,1	80,5	103	127

ким же, как и у объекта [6]. Для получения возможности влиять на длительность переходного процесса в передаточную функцию корректирующего устройства введена производная. Таким образом, была принята передаточная функция корректирующего устройства следующего вида:

$$W_k(s) = \frac{k_k - k_{d1}s}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \quad (5)$$

С учетом (1), (4) и (5) характеристическое уравнение САР имеет вид

$$1 + \frac{K_1 k_o k_{OC} e^{-s\tau}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} - \frac{k_{OC}(k_k - k_{d1}s)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = 0.$$

Обозначив $K_1 k_o k_{OC} = k$, $k_{OC} k_{d1} = k_d$ и учитывая, что $k_{OC} k_k = 1$, после элементарных преобразований получим

$$T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + k_d)s + k e^{-s\tau} = 0.$$

Чтобы переходный процесс был аperiodическим затухающим, корни характеристического уравнения должны быть вещественными отрицательными. Длительность переходного процесса определяется корнем, ближайшим к мнимой оси комплексной плоскости корней. В соответствии с этим в характеристическое уравнение подставим $s = -\alpha$ и найдем, при каких соотношениях k и k_d этот корень будет существовать:

$$T_1 T_2 \alpha^2 - (T_1 + T_2 + k_d)\alpha + k e^{\alpha\tau} = 0. \quad (6)$$

Последнее уравнение разрешим относительно k :

$$k = [(T_1 + T_2 + k_d)\alpha - T_1 T_2 \alpha^2] e^{-\alpha\tau}. \quad (7)$$

Функция $k(\alpha)$ при увеличении α имеет сначала положительное значение, затем отрицательное. Интерес представляют положительные максимальные значения k , так как при таких значениях на вход объекта регулирования будет поступать сигнал наибольшей мощности, и переходный процесс будет сходящимся и наименьшим по длительности. Для нахождения максимальных значений k производную $dk/d\alpha$ приравняем нулю, в результате получим уравнение

$$\tau T_1 T_2 \alpha^2 - [2T_1 T_2 + (T_1 + T_2 + k_d)\tau]\alpha + (T_1 + T_2 + k_d) = 0,$$

откуда получим

$$\alpha = \frac{2T_1 T_2 + \tau(T_1 + T_2 + k_d) - \sqrt{4T_1^2 T_2^2 + \tau^2(T_1 + T_2 + k_d)^2}}{2\tau T_1 T_2}.$$

При вычислении α знак "+" перед корнем соответствует максимальному отрицательному значению k , поэтому учитывается только знак "-". Подставляя в формулу (7) найденные при различных значениях k_d корни α , получим соответствующие максимальные значения k , при которых обеспечивается аperiodический переходный процесс. Найденные для первой моды по X и Y и для первой моды по X и третьей по Y значения k и $K_1 = k/(k_{OC} k_o)$ при ряде принятых значений k_d представлены в табл. 2. Коэффициент обратной связи в расчетах и при моделировании принят равным единице.

Для нахождения коэффициента веса n_1 и коэффициента усиления E_1 распределенного усилительного звена использована система уравнений [1, 16]

$$\begin{cases} K1_1 = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_1 \right); \\ K1_3 = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_3 \right), \end{cases} \quad (8)$$

где $K1_1$ и $K1_3$ — коэффициенты 1-й и 3-й мод распределенного усилительного звена, G_1 и G_3 — обобщенные координаты по 1-й и 3-й модам:

$$G_1 = \left(\frac{\pi}{X_L} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{Y_L} \right)^2 = 54,8;$$

$$G_2 = \left(\frac{\pi}{X_L} \right)^2 + \left(\frac{3\pi}{Y_L} \right)^2 = 274.$$

Значения n_1 и E_1 , вычисленные для ряда значений k_d , представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	Значения					
k_d	0	10	20	30	40	50
n_1	700	618	584	559	543	535
E_1	19,6	29,8	41,8	55,2	70,1	86,3
$t_{пер}, c$	110	95	85	80	75	70
$\sigma, \%$	0,62	0,71	0,76	0,80	0,82	0,83

При рассчитанных по изложенной методике параметрах выполнено математическое моделирование на ЦВМ. Математическая модель объекта регулирования представлена выше, математическая модель системы регулирования соответствует структурной схеме рис. 1, уравнениям (2), (3), (5), а также следующим уравнениям:

$$\begin{cases} F_1 = F_3 - F_{OC}; \\ U = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} F_1 - \frac{1}{n_1} \left(\frac{\partial^2 F_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 F_1}{\partial Y^2} \right) \right]; \\ T_1 T_2 \frac{\partial^2 F_K}{\partial t^2} + (T_1 + T_2) \frac{\partial F_K}{\partial t} + F_K = k_K F_1 - k_{d1} \frac{\partial F_1}{\partial t}; \\ F_2 = \dot{T} - F_K; \\ F_{OC} = k_{OC} F_2. \end{cases} \quad (9)$$

где $\dot{T}$ — температура в заданной области регулирования.

В табл. 3 представлены время регулирования $t_{рег}$ и перерегулирование σ . При определении времени регулирования было принято, что переходный процесс заканчивается, когда температура превышает

99 % установившегося значения. Наличие незначительного перерегулирования можно объяснить двумя причинами: дискретизацией пространственных координат при моделировании и допущениями при аппроксимации переходных характеристик объекта регулирования. Если при моделировании использовать звенья с сосредоточенными параметрами, соответствующие передаточной функции (4), то перерегулирование отсутствует.

Кривые переходного процесса, полученные математическим моделированием принятого объекта в системе с различными параметрами k_d , n_1 и E_1 , указанными в табл. 3, представлены на рис. 3.

Представленные кривые наглядно иллюстрируют уменьшение длительности переходного процесса при увеличении коэффициента при производной корректирующего устройства, при этом переходный процесс остается аperiодическим.

Выполнено также моделирование процессов при регулировании температуры в двух соседних по оси Y зонах пластины, отстоящих друг от друга на 0,1 м. Соответствующие кривые изменения температуры представлены на рис. 4. Задающий сигнал на второй канал регулирования подан через 20 с после начала работы первого. Через 80 с на вторую зону регулирования температуры подано скачкообразное возмущающее воздействие, вызвавшее снижение температуры в этой зоне.

Использование распределенного регулятора обеспечивает практически независимую работу двух контуров, что подтверждают полученные кривые. Рис. 4 также иллюстрирует свойство астатизма системы регулирования (после подачи возмущения температура во второй зоне вернулась к заданному значению).

Выполненные расчеты и моделирование позволяют сделать вывод о том, что уменьшение времени регулирования в рассматриваемой системе достигается увеличением коэффициента при производной в корректирующем устройстве. Но при этом необходимо увеличивать коэффициент распределенного усилительного звена, т.е. повышать мощность сигнала на входе объекта регулирования. Таким образом, минимальное время регулирования в системах рассматриваемого типа ограничивается мощностью устройства, формирующего сигнал управления, и допустимой мощностью на входе объекта регулирования.

Для сравнения на рис. 5 представлены кривые переходных процессов, полученные в системе с па-

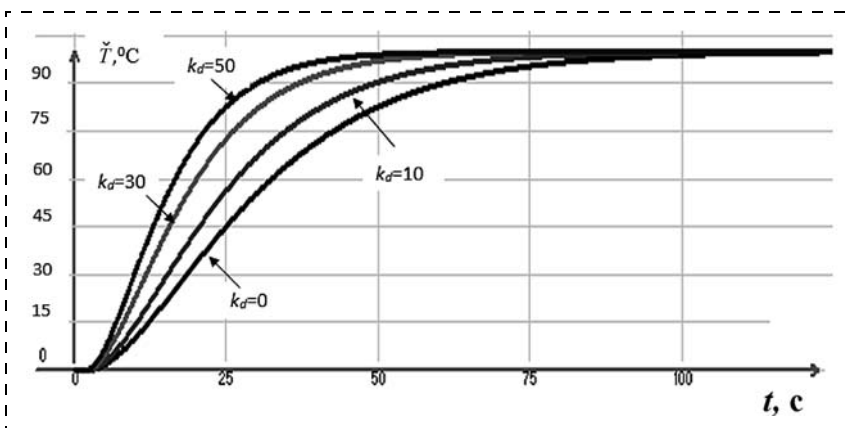


Рис. 3. Кривые переходных процессов



Рис. 4. Переходные характеристики при регулировании температуры в двух зонах

раллельным корректирующим устройством при $k = 11,3$ и $k_d = 100$, и в системе с распределенным ПИД регулятором для одного и того же объекта. Параметры ПИД регулятора для первой и третьей моды входного воздействия рассчитаны по квадратичному минимуму с первой производной. Коэффициенты веса и коэффициенты усиления для пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей распределенного регулятора рассчитаны по формулам, аналогичным (10). Следует заметить, что при использовании ПИД регулятора сократить время регулирования при апериодическом переходном процессе по сравнению с полученным не представляется возможным.

Выводы

1. Использование САР с параллельным корректирующим устройством для объектов с распределенными параметрами позволяет получить переходные процессы с незначительным, не превышающим 1 %, перерегулированием и скоростью регулирования, более высокой, чем при использовании систем с ПИД регулятором.

2. Для получения возможности выполнить расчет параметров корректирующего устройства с введением производной в закон регулирования переходные характеристики распределенного объекта регулирования по каждой пространственной моде следует аппроксимировать апериодическим звеном не ниже второго порядка с запаздыванием.

3. Использованный корневой метод расчета позволяет получить параметры САР, обеспечивающие изменение регулируемой величины на выходе объекта регулирования с распределенными параметрами по апериодическому закону с незначительным перерегулированием и временем, ограничивающимся только допустимым максимальным сигналом на входе объекта регулирования.

Список литературы

1. Малков А. В., Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 472 с.
2. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О проблеме согласо- параллельной коррекции систем регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. Том 16. 2015. № 8. С. 507—514.
3. Афанасьев Г. Д. Один из способов построения астатических САР // Материалы всероссийской научной конференции "Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу". Пятигорск: Изд. СКФУ. 2013. С. 17—22.
4. Афанасьев Г. Д., Афанасьева И. Г. Расчет систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим

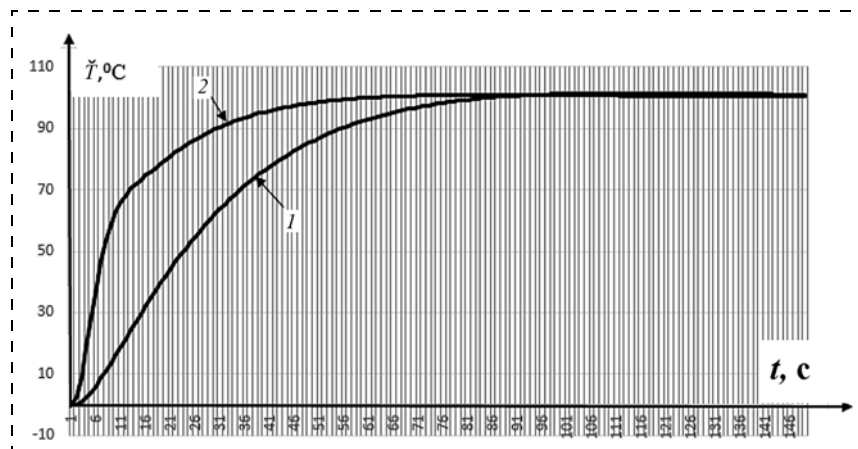


Рис. 5. Переходные характеристики: 1 — в системе с ПИД регулятором; 2 — в системе с параллельным корректирующим устройством

устройством. // Сборник научных трудов V Международной научной конференции "Системный анализ и прикладная синергетика". Том III. Пятигорск: Изд. СКФУ, 2013. С. 18—24.

5. Афанасьева И. Г. Расчет параметров САР с параллельным корректирующим устройством и объектом регулирования с запаздыванием // Сборник научных трудов 2-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ "Университетская наука региону". Т. I. Пятигорск: Изд. СКФУ, 2014. С. 102—108.

6. Афанасьева И. Г. Системы автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством // Материалы Всероссийской научной конференции "Системный анализ и прикладная синергетика". Таганрог: Изд. ЮФУ, 2015. С. 196—204.

7. Афанасьева И. Г. Устойчивость распределенных систем автоматического регулирования с параллельным корректирующим устройством. // В мире научных открытий. — Красноярск: Научно-инновационный центр. 2015. № 6. 1 (166). С. 462—475.

8. Bar-Kana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control // Int. Journ. Adapt. Control and Signal Processing. 1987. Vol. 1. P. 95—109.

9. Bartolini G., Ferrara A., Stotsky A. Stability and Exponential Stability of an Adaptive Control Scheme for Plants of any Relative Degree // IEEE Trans. Autom. Contr. 1995. Vol. 40, N 1.

10. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 767 с.

11. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. I. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 768 с.

12. Першин И. М. Синтез систем с распределенными параметрами. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 235—241.

13. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

14. Теплохимический справочник. Т. 2 / Под ред. В. Н. Юрнева, П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. 896 с.

15. Олейников В. А., Тихонов О. В. Автоматизация обога- тельных фабрик. Ленинград: Недра, 1966. 325 с.

16. Першин И. М. Синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во "РИО КМВ", 2002. 212 с.

Calculation of the Parameters of the Distributed Automatic Control Systems with Parallel Corrective Devices

G. D. Afanasyev, nauka-pf@yandex.ru✉, **I. G. Afanasyeva**, ira.afanaseva.70@mail.ru,
North-Caucasian Federal University (Pyatigorsk Branch), Pyatigorsk, 357500, Russian Federation

Corresponding author: **Afanasyev Gennadiy D.**, Ph. D., Associate Professor,
Pyatigorsk, 357500, Russian Federation,
e-mail: nauka-pf@yandex.ru

Received on April 21, 2015

Accepted on September 22, 2015

For dimensioning of the regulators of the automatic control objects with the distributed parameters the methods are used, which take into account the final range of the spatial modes. In this case, for each mode the transfer function is approximated by the finite polynomials of the degree of n . As a rule, the transfer function of the first order and an aperiodic link with a delay are used. In this paper, the authors consider the systems, in which astatism is achieved due to a correction device included in parallel with the unchangeable part of the system. Here a methodology is presented for calculation of the system parameters at an approximation object of a regulation aperiodic link of the second order. This approximation allows us to use the methodology for calculation of a correction device, which forms a signal containing the first derivative of the input signal. The design procedure of the parameters is based on the requirement to obtain for each spatial mode an aperiodic transition process with the least possible time of regulation. It is demonstrated that introduction of a derivative in the law of the signal at the output of the correction device with increasing of the coefficient of derivative can appropriately increase the distribution coefficient of the amplifier unit, resulting in enhancing of the performance of the system during the transition process. In such a way the system's performance is limited only by the maximal permissible signal at the input object of regulation. By means of a mathematical adjustment the work confirms the possibility of obtaining high levels of the quality control when using the systems in question and the proposed method of calculation for the objects with the distributed parameters. It shows the curves of the transient processes' temperature control in a single distribution point object (steel plate), and two closely spaced points. It was demonstrated that the use of the considered systems and the distributed amplifier links ensured a virtually independent temperature control in the two areas of the object.

Keywords: automatic control system, object with delay, parallel correcting device, transition process, aperiodic element of the first order, object of regulation, transfer function, object with distributed parameters, amplifier link, curves of the transient processes

For citation:

Afanasyev G. D., Afanasyeva I. G. Calculation of the Parameters of the Distributed Automatic Control Systems with Parallel Corrective Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no 1, pp. 227—232.

DOI: 10.17587/mau/17.227-232

References

1. **Malkov A. V., Pershin I. M.** *Sistemy s raspredelyonnymi parametrami. Analiz i sintez* (Systems with distributed parameters. Analysis and Synthesis), Moscow, Nauchnyj mir, 2012, 473 p. (in Russian).
2. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Oprobleme soglasno-paralleln'oj korektsii sistem regulirovaniya* (Concerning the Problem of a Parallel Feedforward Correction of the Regulation Systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2015, vol. 16, no. 8, p. 507—514 (in Russian).
3. **Afanas'ev G. D.** *Odin iz sposobov postroeniya astaticheskikh SAR* (One of the ways for constructing astatic SAR), *Proc. of the Scientific Conf. "Vuzovskaya nauka Severo-Kavkazskomu federal'nomu okргу"*, Pyatigorsk, Publishing house of SKFU, 2013, p. 17—22 (in Russian).
4. **Afanas'ev G. D., Afanas'eva I. G.** *Raschyot sistem avtomaticheskogo regulirovaniya s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom* (Automatic control systems with parallel correction device), *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Sistemnyj analiz i prikladnaya sinergetika*, vol. 3, Pyatigorsk, Publishing house of SKFU, 2013, p. 18—24 (in Russian).
5. **Afanas'eva I. G.** *Raschyot parametrov SAR s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom i ob'ektom regulirovaniya s zapazdyvaniem* (Calculation of automatic control system with parallel correction devices and objects regulation with delay), *Sbornik nauchnykh trudov 2-j ezhegodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, studentov i molodykh uchyonnykh SKFU "Universitetskaya nauka regionu"*, vol. 1, Pyatigorsk, Publishing house of SKFU, 2014, p. 102—108 (in Russian).
6. **Afanas'eva I. G.** *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom* (Automatic control systems with parallel correction device), *Proc. of the 7 th All-Russian Scientific. Con. "System synthesis and Applied Synergetics" (SSPS-2015)*, Taganrog, Publishing house of SFU, 2015, p. 196—205 (in Russian).
7. **Afanas'eva I. G.** *Ustojchivost' raspredelyonnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya s parallel'nym korrrektiruyushchim ustroystvom* (Stability of distributed systems of automatic control with parallel corrective device), *V mire nauchnykh otkrytij*, Krasnoyarsk, Nauchno-innovacionnyj centr, 2015, no. 6. 1 (166), p. 462—475 (in Russian).
8. **Bar-Kana I.** *Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control*, *Int. Journ. Adapt. Control and Signal Processing*, 1987, vol. 1, p. 95—109.
9. **Bartolini G., Ferrara A., Stotsky A.** *Stability and Exponential Stability of an Adaptive Control Scheme for Plants of any Relative Degree*, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 1995, vol. 40, no. 1.
10. **Bessekerskij V. A., Popov E. P.** *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (The theory of automatic control systems), Moscow, Nauka, 1972, 767 p. (in Russian).
11. **Solodovnikov V. V.** *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kn. 1. Matematicheskoe opisaniye, analiz ustojchivosti i kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of automatic regulation. Book 1. Mathematical description, analysis of the stability and quality of the automatic control systems), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 768 p. (in Russian).
12. **Pershin I. M.** *Sintez sistem s raspredelyonnymi parametrami* (Synthesis systems with distributed parameters), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 6, p. 235—241 (in Russian).
13. **Lykov A. V.** *Teoriya teploprovodnosti* (The theory of thermal conductivity), Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (in Russian).
14. **Yurnev V. N., Lebedev P. D. ed.** *Teplokhimicheskij spravochnik* (Thermotechnical reference book), vol. 2, Moscow, Energiya, 1976, 896 p. (in Russian).
15. **Olejnikov V. A., Tikhonov O. V.** *Avtomatizatsiya obogatitelnykh fabrik* (Automation of concentrating factories), Leningrad, Nedra, 1966, 325 p. (in Russian).
16. **Pershin I. M.** *Sintez sistem s raspredelennymi parametrami* (Synthesis of systems with distributed parameters), Pyatigorsk, Publishing house of "RIO KVM", 2002, 212 p. (in Russian).

Н. Н. Болотник, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией, bolotnik@ipmnet.ru,

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,

А. А. Жуков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., design-centre@spacecorp.ru,

Д. В. Козлов, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., risc3@mail.ru,

А. С. Корпухин, канд. техн. наук, нач. отдела, design-centre@spacecorp.ru,

И. П. Смирнов, нач. сектора, design-centre@spacecorp.ru,

АО "Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем", г. Москва

Перспективы использования полиимида в исполнительных устройствах мехатронных микросистем¹

Анализируются известные и практически реализованные технические решения в части применения полиимида в устройствах микросистемной техники космического назначения. Варианты применения классифицированы по функциональному назначению, приведены достоинства и недостатки полиимида при использовании его в современных изделиях, рассмотрены технологические приемы формирования полиимидных слоев.

Ключевые слова: полиимид, мембрана, микромеханика, микроэлектромеханическая система, сочленение, торсион, покрытие, пленка, диэлектрик, актюатор

Введение

К устройствам микросистемной техники сегодня относят совокупность микроэлектронных управляющих и функциональных исполнительных компонентов в едином конструктивном исполнении, принцип действия которых базируется на эффектах, существенно проявляющихся на микроуровне, а технология изготовления основана как на планарных, так и на объемных методах микрообработки. Подобные устройства часто отличаются наличием подвижных объемных конструктивных элементов, выполненных с применением нехарактерных для полупроводниковой микроэлектроники материалов. Применение новых материалов в конструкции позволяет упростить технологический процесс, улучшить характеристики изделий и повысить их функциональность. Одним из таких материалов является органический диэлектрический полимер — полиимид (полипиромеллитимид). Полиимид является хорошо изученным материалом [1], открытым много десятилетий назад, основное применение данный материал находит в качестве диэлектрика для разделения электропроводящих слоев и для их защиты. Также он имеет множество более широких функциональных возможностей, которые могут оказаться полезными при разработке микроэлектромеханических устройств. Благодаря высокой устойчивости к дестабилизирующим факторам космического простран-

ства [2] и высоким физико-механическим показателям особенно актуальным полиимид становится в условиях открытого космоса, однако систематических данных по применению полиимида в устройствах микросистемной техники космического назначения недостаточно.

Основной задачей работы является анализ и обобщение данных по применению полиимида в устройствах микросистемной техники космического назначения.

Основные сведения

Полиимид, в первую очередь, обладает хорошими механическими, диэлектрическими свойствами и высоким значением температурного коэффициента линейного расширения, что и определяет сферы его применения. Его основные электрофизические и механические свойства приведены в работе [3]. Кроме того, полиимид обладает высокой адгезией ко многим материалам, высокой химической стойкостью (в том числе ко многим растворителям и слабым кислотам), температурной стойкостью (температура эксплуатации от -196 до $+380$ °С, кратковременно до $+400$ °С), радиационной стойкостью (среди полимерных материалов полиимид обладает наиболее высокой радиационной стойкостью, диэлектрическая проницаемость изменяется на 5...20 % при дозе облучения 1 МГр) [4]. Тем не менее, несмотря на высокую устойчивость к дестабилизирующим факторам, при использовании полиимида в открытом космосе на высотах 200...700 км одним из наиболее разрушающих факторов явля-

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00949).

Применение полиимида в устройствах микросистемной техники

Наименование функционального слоя	Основные устройства, в которых возможно применение	Технический эффект от применения	Источник
Диэлектрические покрытия	Устройства с электрическими соединениями в кристалле	Электроизоляция между проводниками, защита от короткого замыкания	[5]
Упрочняющие/защитные покрытия	Устройства, подверженные жестким условиям эксплуатации	Благодаря возможности внесения в полимер примесей (например, углеродные нанотрубки) покрытие обеспечивает высокую устойчивость к механическим повреждениям (в том числе при нагрузках на разрыв и при трении)	[6]
Термодеформационные слои	Актуаторные механизмы, использующие тепловую деформацию полиимида	Преобразование энергии тепла в движение, тем самым обеспечивается управляемое перемещение элементов устройства	[7–9]
Формованные гибкие пленки (реплики поверхностей)	Демпфирующие пленки, формованные защитные пленки	Электрическая изоляция элементов конструкции, а также их защита от вибрации и ударов	[10]
Электропроводящие межслойные переходы	Устройства с электрическими соединениями в многослойных конструкциях	Обеспечивается электрический контакт между проводниками, расположенными на разных конструкционно-технологических слоях устройства	[13]
Гибкие элементы конструкции	Сочленения, гибкие соединения в устройствах микроробототехники	Обеспечивают механическую ненапряженную связь между отдельными перемещающимися элементами конструкции	[14–17]
Планирующие слои	Конструкции, содержащие элементы с острыми гранями	Позволяет повысить укрывистость и качество в целом наносимых на неровные поверхности покрытий	[18]
Мембранные элементы конструкции	Датчиковая аппаратура	Технологическая возможность получения мембранных элементов на поверхности пластины-основания	[10]
Свободные (отдельные) пленки	Защитные пленки	Электрическая и механическая защита элементов конструкции	[10]
Несущие основания	Гибкие печатные платы, носители со сформированными функциональными слоями	Обеспечивают механически прочное и в то же время гибкое основание для элементов электроустройства	[19]

ется воздействие набегающего потока атомарного кислорода [2, 3]. Данный аспект необходимо учитывать при конструировании устройств микросистемной техники.

Применение полиимида в устройствах микросистемной техники можно классифицировать по функциональному назначению полиимидного слоя в конструкции изделия. Основные сферы применения: диэлектрические покрытия, упрочняющие и защитные покрытия, термодеформационные слои, формованные гибкие пленки (реплики поверхностей), разделяющие слои с электропроводящими межслойными переходами, гибкие сочленения элементов микромеханики и микроробототехники, планирующие слои, мембраны и свободные (отдельные) пленки (одно- и многослойные), а также несущие основания для компонентов микроэлектроники. При этом стоит отметить, что некоторые из приведенных выше функциональных особенностей вполне могут пересекаться в рамках одной конструкции. В таблице приведены основные сферы использования полиимида в устройствах микросистемной техники и их основные достоинства.

Практическая реализация

Рассмотрим подробнее каждую из областей техники, в которой полиимид находит применение.

Как уже уточнялось выше, использование полиимида в качестве диэлектрика и защитного покрытия является основным и известно давно. Отметим здесь стоит только малоизученную возможность увеличения прочностных характеристик полимера в имидизованном состоянии за счет внесения в его структуру углеродных нанотрубок или иных армирующих веществ. Данный эффект был подробно проанализирован в работе [6], и результаты позволили подтвердить эффективность данного метода: авторам удалось добиться практически трехкратного улучшения усталостных характеристик актуаторных элементов на основе полиимида. Что касается электрических свойств полиимида, то благодаря высокому значению электрического сопротивления его с успехом можно применять как для финишной, так и для межслойной изоляции проводников. При этом выбирают толщину слоя полиимида, которая варьируется от единиц до нескольких десятков микрон, в зависимости от напряжения на проводниках.

Благодаря высокому коэффициенту температурного расширения полиимид нашел уникальное применение в термомеханических биморфных актуаторах [7] — устройствах, в которых перемещение элементов осуществляется за счет термической деформации полиимида. Благодаря биморфной кон-

струкции при соединении двух материалов с резко различающимися коэффициентами температурного расширения при изменении температуры происходит деформация материалов и перемещение подвижной балки актюатора. Конструкция может состоять либо из двух наложенных друг на друга слоев (классическая биморфная конструкция), либо представлять собой массив расположенных друг за другом кремниевых элементов трапецевидного сечения из материала с низким коэффициентом температурного расширения, заполняющего получившиеся в такой конструкции V-образные канавки материала с высоким температурным коэффициентом расширения, которым и является полиимид. В качестве первого материала удобно использовать кремний, тем самым, процесс изготовления устройства становится групповым. Схематично конструкция и фотографии термомеханического актюатора с чувствительным слоем показаны на рис. 1 (см. вторую сторону обложки) [8, 9, 11]. Примененный в конструкции чувствительный слой позволяет совместить в одном устройстве функции актюаторного и сенсорного элементов. Проводники чувствительного слоя образуют обкладки конденсатора, емкость которого зависит от перемещения подвижной балки, влажности и освещенности [8, 9]. Полиимид в такой конструкции, помимо функции перемещения балки актюатора, играет роль диэлектрика между обкладками конденсатора (между проводником и кремнием).

Полиимидная пленка, сформированная на рельефной поверхности после отделения от последней, принимает форму этой поверхности, т. е. повторяет рельеф (рис. 2). Технологически такую репликацию [12] можно осуществить несколькими методами, которые отличаются друг от друга способами отделения полиимидного слоя от несущего основания. Полученную таким образом структуру можно использовать как покрывающий электроизоляционный материал для элементов нестандартной формы, либо в качестве демпфирующего материала в конструкциях, требующих защиты от внешних механических воздействий. Демпфирующий эффект достигается за счет формы полученной реплики. Аналогичным способом возможно получение разнотолщинных полиимидных пленок на гладких поверхностях, такие пленки целесообразно использовать в микросборках различных устройств микросистемной техники, в том числе при их корпусировании для защиты элементов от механических повреждений и от короткого замыкания.

Предложен вариант электропроводящего перехода с одной стороны пластины на другую с помощью полиимидного слоя в "окнах" кремния (рис. 3). Для изготовления таких элементов первоначально на подложке кремния анизотропным травлением на одной из сторон пластины формируют области, где будут располагаться отверстия в полиимиде, после чего на эту сторону наносят полиимидный слой и травят данные области с другой стороны до

полиимида. Далее наносят электропроводящий слой с одной из сторон, формируют отверстия в полиимиде и наносят электропроводящий слой с другой стороны подложки. Такая технология позволяет сформировать электрический переход с одной стороны подложки на другую. Данное решение актуально не только для разработанных актюаторов, но может найти применение и в массе других изделий, содержащих электрические соединения слоев. По результатам испытаний электропроводящего перехода через полиимидный слой наблюдалась высокая адгезия (до 10 МПа) металлизированного слоя к основанию и полиимиду и низкое электрическое сопротивление полученного контакта (до 5 Ом).

В работе [13] рассмотрена технология многослойных покрытий с диэлектрическим полиимидным слоем, электропроводящими дорожками и межслойными переходами через полиимид. Покрытия формируют на твердом основании с возможностью дальнейшего отделения многослойной структуры от него. Это значительно расширяет возможности электрического соединения компонентов, расположенных на подложке, увеличивается возможная длина и число линий связи между компонентами, становятся реализуемыми технологические варианты конструкций плоских индуктивных катушек, изготовленных по технологиям объемной и поверхностной микрообработки. Слои металлизации

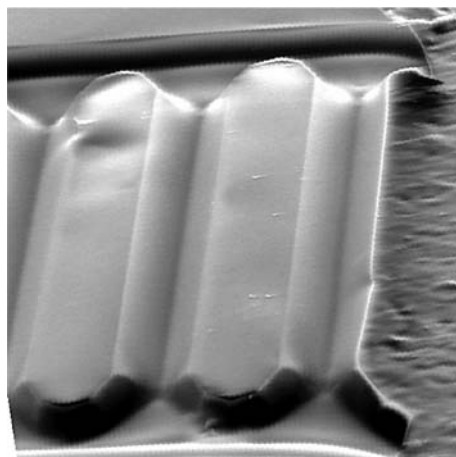


Рис. 2. Образец полиимидной пленки — реплики поверхности [12]

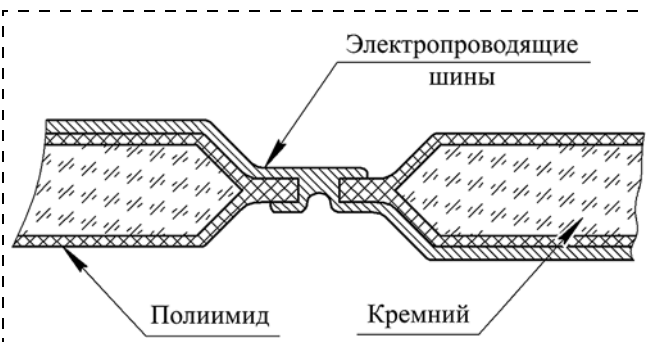


Рис. 3. Структура электропроводящего перехода

каждого витка намотки в такой конструкции разделены диэлектриком в виде полиимида, а контакт между слоями образуется с применением вышеописанных методов получения электропроводящих металлизированных переходов.

Способность к многократному изгибу полиимидной пленки позволяет использовать ее при изготовлении высокочувствительных мембран и гибких вставок устройств микромеханики и микроробототехники [14–17]. Благодаря возможности технологически (контролируя толщину наносимого слоя полиимида) регулировать упругие свойства полиимидной пленки и частично или полностью отделять ее от подложки, на которой она формируется, можно создавать гибкие элементы конструкции, работающие на изгиб или кручение, высоконадежные гибкие соединения, обеспечивающие изгиб/поворот элементов конструкции. Конструкция гибкого соединения состоит из одного или пары полиимидных слоев, наложенных с прямой и/или обратной сторон кремниевых элементов и соединяющих их. Подобные изделия показаны на рис. 4. По результатам испытаний гибкие элементы шириной 1 мм и длиной 1,5 мм обеспечивают усилие от десятых долей до десятков мкН на градус углового перемещения.

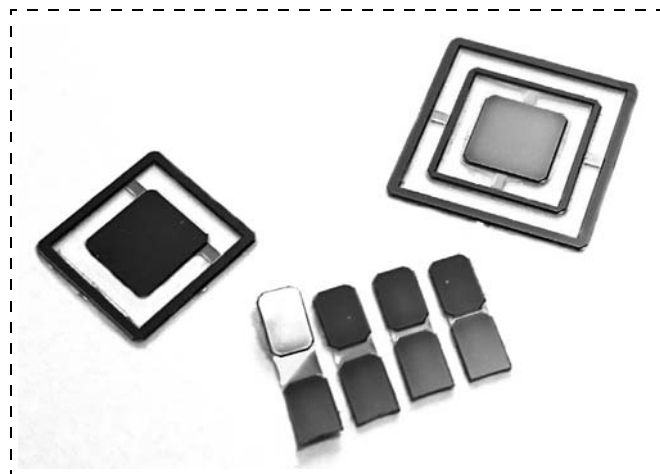


Рис. 4. Образцы гибких соединений

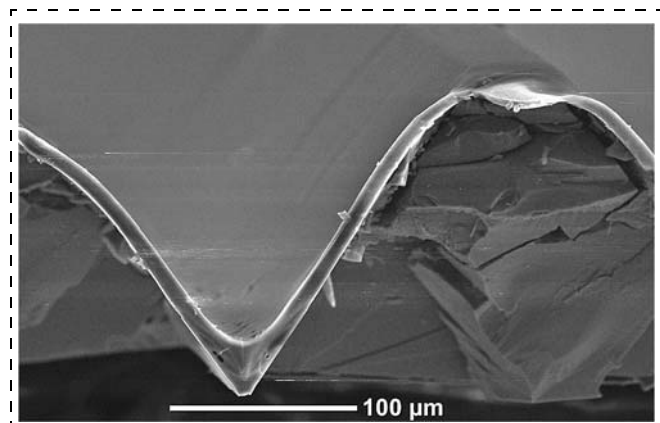


Рис. 5. Покрытая полиимидом рельефная поверхность кремния

Полиимид может применяться для частичной планаризации неоднородной, шероховатой, неровной поверхности изделий на различных стадиях производства, в частности, на операциях нанесения фоторезиста или напыления. Полиимид позволяет сгладить неровности, в особенности на острых гранях, которые появляются при глубинном травлении кремния и, тем самым, повысить укрывистость и однородность наносимого слоя, избежав зон с "пробелами". Полиимид широко используется с этой целью, в частности, при производстве актюаторных элементов [18]. При выполнении операции нанесения фоторезиста на остроугольных гранях могут образовываться дефекты. Использование полиимида позволяет сгладить грани (рис. 5) и избавиться от возможных дефектов при формировании металлизированных слоев сверху полиимида [18]. Кроме того, в данном случае полиимид служит также диэлектрическим изолятором между кремнием и формируемым слоем металла.

При использовании полиимида в качестве несущего основания становится возможным получать гибкие подложки со сформированной в них одно- или многослойной топологией электропроводящих шин. Стандартные методы производства подобных конструкций широко применяются при изготовлении гибких печатных плат. Отметим, что подобные конструкции возможны и на микроуровне. Достигается это последовательным нанесением металлизированных слоев и слоев полиимида и дальнейшим отделением полученной структуры от несущей подложки [14].

Полиимид при использовании его в качестве функциональных слоев устройств микросистемной техники обладает высокой технологичностью. Процесс формирования заключается в последовательности выполнения операций нанесения и термообработки (сушки и имидизации), а также, при необходимости, фотолитографии и плазмохимического травления функционального слоя полимера. Перед нанесением полимера в зависимости от типа поверхности подложки наносят промотор адгезии для увеличения сил адгезионного взаимодействия между материалами и увеличения надежности устройства в целом. В случае с подложкой из кремния таким промотором является γ -аминопропилтриэтоксисилан, который предварительно наносят на подложку и высушивают [12]. Нанесение полиимида проводят одним из трех методов (по степени равномерности покрытия): центрифугированием, спреевым распылением или кистью. После нанесения проводят термообработку полиимида: сушку и имидизацию. При необходимости внесения армирующих элементов в структуру полимера на поверхность сначала наносят тонкий слой раствора полиамидокислоты с содержанием армирующих элементов (например, одностенных углеродных нанотрубок), который в дальнейшем подсушивают, а затем уже на него наносят более толстый слой той же концентрации раствора полиамидокислоты,

но не содержащий армирующих элементов. Имидизацию проводят в вакууме или среде сухого азота ступенчатым нагревом при максимальной температуре, не превышающей 350 °С, температуру выбирают исходя из необходимой степени усадки полимера. В случае многослойных структур благодаря высокой адгезии слоев полиимида друг с другом описанные выше процессы повторяются, пока не сформируется необходимое для функционирования устройства число слоев. Далее, при необходимости формирования рисунка в полученном слое полиимида проводят фотолитографические процессы. В качестве маски, обеспечивающей селективность травления, можно использовать металлы, в том числе алюминий. Негативный топологический рисунок изначально формируют на алюминиевой маске, после чего через открытые "окна" проводят жидкостное травление алюминия и плазмохимическое травление полиимида в кислородной плазме. Заключительным этапом является снятие остатков вспомогательного слоя алюминия. Технология формирования полиимидных функциональных слоев в устройствах микросистемной техники позволяет получить адгезионно-прочные элементы конструкции с высокой точностью изготовления как по толщине (точность до 1 мкм), так и по горизонтальным размерам (в соответствии с топологической нормой производства).

Заключение

В работе проведен анализ вариантов применения полиимида (полипиромеллитимида), формируемого по растворной технологии в качестве конструкционного и технологического материала в микросистемной технике космического назначения, представлены конкретные технические решения. Применение полиимида обусловлено свойствами, наиболее полно отвечающими требованиям эксплуатации и воздействию внешних факторов: термостойкость, физико-механические характеристики, радиационная стойкость, электрическая прочность. Показано, что применение полиимида в устройствах космической микроробототехники перспективно в связи с высокой устойчивостью материала к механическому воздействию и различным дестабилизирующим факторам космического пространства. Выявлены ограничения применения полиимида в устройствах космической микроробототехники для эксплуатации в открытом космическом пространстве, связанные с травлением материала в атомарном кислороде на низких околоземных орбитах и необходимостью обеспечивать устойчивую адгезию к конструкционным материалам устройств.

Список литературы

1. Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А. Полиимиды — класс термостойких полимеров. Санкт-Петербург: Наука, 1983. 328 с.
2. Панасюк М. И., Новиков Л. С. (ред.) Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Москва: Издательство КДУ, 2007. 1144 с.
3. Матвеев В. В., Никифоров А. П., Скурат В. Е., Чалых А. Е. О механизме возникновения шероховатости поверхности полимерных материалов при анизотропном травлении пучком быстрого атомарного кислорода // Химическая физика. 1998. Т. 17. № 4. С. 120—128.
4. Maluf N., Williams K. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. Artech House, Inc. Boston, London, 2004. 304 p.
5. Басовский А. А., Жуков А. А., Анурова Л. В., Харитонов В. А. Способ изготовления шунтирующего диода для солнечных батарей космических аппаратов. Пат. 2411607 РФ, МПК2011 H01L21/329. АО "Российские космические системы". Заяв. 26.11.2009. Оpubл. 10.02.2011. Б. И. № 4. 8 с.
6. Корпухин А. С., Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Пешехонцев И. И. Влияние армирования полиимидного слоя одностенными углеродными нанотрубками на термодинамические характеристики полиимид-кремниевых балок тепловых микроактюаторов // Материаловедение. 2011. № 9. С. 43—46.
7. Ebefors T. Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers. Ph. D. thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2000. 144 p.
8. Козлов Д. В., Смирнов И. П. Функциональные возможности универсальных датчиков на основе термомеханических актюаторов // Инновации и инвестиции. 2013. № 5. С. 191—193.
9. Козлов Д. В., Смирнов И. П. Микросистемный емкостной датчик измерения физических величин. Пат. 2541415 РФ, МПК2014 G01D5/24, B81B7/02. АО "Российские космические системы". Заяв. 26.09.2013. Оpubл. 10.02.2015. Б. И. № 4. 8 с.
10. Жуков А. А. Физико-технологические основы получения полиимидных структур для микроэлектронных устройств, устройств микромеханики и микросенсорники: дис. ... докт. техн. наук. М., 2003.
11. Корпухин А. С., Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Бабаевский П. Г. Влияние условий формирования и толщины слоев на термодинамические характеристики полиимид-кремниевых упруго-шарнирных балок тепловых актюаторов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 34—40.
12. Веселого В. Г., Жуков А. А., Корпухин А. С., Капустин А. В., Лаврищев В. П. Способ изготовления метаматериала (варианты). Пат. 2522694 РФ, МПК2014 H01Q1/38. АО "Российские космические системы". Заяв. 07.09.2012. Оpubл. 20.07.2014. Б. И. № 20. 13 с.
13. Datta M., Osaka T., Schultze J. W. (Eds.). Microelectronic Packaging. CRC Press, Boca Raton, 2005. 564 p.
14. Козлов Д. В., Смирнов И. П., Жуков А. А., Чашухин В. Г., Градецкий В. Г., Болотник Н. Н. Микросистемный космический робот-инспектор (варианты). Пат. 2566454 РФ МПК2015 B25J 11/00, B64G 4/00. АО "Российские космические системы". Заяв. 11.03.2014. Оpubл. 27.10.2015. Б. И. № 30. 19 с.
15. Смирнов И. П., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Жуков А. А. Микросистемное устройство управления поверхностью для крепления малогабаритной антенны Пат. 2456720 РФ, МПК2012 H01Q 1/28. АО "Российские космические системы". Заяв. 11.03.2011. Оpubл. 20.07.2012. Б. И. № 20. 15 с.
16. Erdem E. Y., Chen Y. M., Mohebbi M., Darling R. B., Böhringer K. F., Suh J. W., Kovacs G. T. A. Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot // Journal of Microelectromechanical Systems. 2010. No. 19 (3). P. 433—442.
17. Kälvesten E., Ebefors T., Mattsson J. U., Stemme G. A walking silicon micro-robot // The 10th Int Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99), Sendai, Japan, 1999. P. 1202—1205.
18. Смирнов И. П., Жуков А. А., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Бабаевский П. Г. Тепловой микромеханический актюатор и способ его изготовления. Пат. 2448896 РФ, МПК2012 B81B 3/00, B81C 1/00, B81B 7/00. АО "Российские космические системы". Заяв. 25.03.2012; Оpubл. 27.04.2012, Б. И. № 12.20 с.
19. Khandpur R. S. Printed circuit boards: design, fabrication and assembly. Tata McGraw-Hill Education. New Delhi, 2005. 704 p.

Prospects for Using Polyimide in Actuators of Mechatronic Microsystems

N. N. Bolotnik, bolotnik@ipmnet.ru✉, Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russian Federation,
A. A. Zhukov, design-centre@spacecorp.ru, **D. V. Kozlov**, risc3@mail.ru,
A. S. Korpukhin, design-centre@spacecorp.ru, **I. P. Smirnov**, design-centre@spacecorp.ru,
Joint-Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding author: **Bolotnik Nikolay N.**, D. Sc., Head of Robotics and Mechatronics Department,
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: bolotnik@ipmnet.ru

Received on December 04, 2015

Accepted on December 11, 2015

In this paper, well-known engineering solutions that are used in practice are analyzed in terms of utilizing polyimide in space microsystem devices. Possible applications are classified according to their functional roles. Advantages and disadvantages of using polyimide in modern engineering structures are discussed. Technological methods for forming polyimide layers are considered. The main aim of this study is to analyze and summarize the data about polyimide as a promising material for using in microsystem technologies for space applications. Polyimide possesses good mechanical and dielectric properties and has high coefficient of linear thermal expansion. In microsystem engineering, polyimide layers may find numerous applications. They can be used as dielectric coatings; hardening and protective coatings; thermal deformation layers; molded flexible films; separating layers with conductive interlayer buses; flexible joints and other components in micromechanics and micro-robotics; planarization layers; membranes and films; a supporting base for microelectronic components. Polyimide has high adaptability when used as functional layers in microsystem devices. Modern technologies for forming functional polyimide layers in microsystem engineering allow high-precision manufacturing of adhesion-strong design elements. Polyimide has high mechanical strength and is resistant to various destabilizing factors of space. These properties make polyimide prospective for using in space microrobotic devices. The use of polyimide in outer space is limited by the facts that this material is subject to etching in atomic oxygen in low near-earth orbits and that it is necessary to ensure stable adhesion of polyimide to structural materials of the devices.

Keywords: polyimide, membrane, micromechanics, microelectromechanical system, joint, torsion, coating, film, dielectric, actuator

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 14-19-00949.

For citation:

Bolotnik N. N., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Smirnov I. P. Prospects for Using Polyimide in Actuators of Mechatronic Microsystems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 233–239.

DOI: 10.17587/mau/17.233-239

References

1. **Bessonov M. I., Koton M. M., Kudryavtsev V. V., Laius L. A.** *Poliimidy — klass termostoikikh polimerov* (Polyimides Are a Class of Heat-resistant Polymers), St-Petersburg, Nauka, 1983, 328 p. (in Russian).
2. **Panasuk M. I., Novikov L. S. (Eds.).** *Model' kosmosa. T. 2. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* (Model of Space. Vol. 2. The Influence of the Space Environment on Materials and Spacecraft Equipment), Moscow, KDU, 2007, 1144 p. (in Russian).
3. **Matveev V. V., Nikiforov A. P., Skurat V. E., Chalykh A. E.** *O mekhanizme vzniknoveniya sherokhovatosti poverkhnosti polimernykh materialov pri anizotropnom travlenii puchkom bystrogo atomarnogo kisloroda* (On the Nature of Surface Roughness of Polymer Materials Subject to Anisotropic Etching by a Beam of Fast Atomic Oxygen), *Khimicheskaya Fizika*, 1998, vol. 17, no. 4, pp. 120–128 (in Russian).
4. **Maluf N., Williams K.** *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Boston, London, Artech House, Inc. 2004, 304 p.
5. **Basovskii A. A., Zhukov A. A., Anurova L. V., Kharitonov V. A.** *Sposob izgotovleniya shuntiruyushchego dioda dlya solnechnykh batarei kosmicheskikh apparatov* (A Method for Manufacturing Bypass Diodes for Spacecraft Solar Batteries), RF Patent No. 2411607 RF, MPK2011 H01L21/329. Byull. Izobter., no. 4, 2017 (in Russian).
6. **Korpukhin A. S., Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Peshekhontsev I. I.** *Vliyanie armirovaniya poliimidnogo sloya odnosnennymi uglerodnymi nanotrubkami na termodeformatsionnye kharakteristiki poliimid-kremnievykh balok teplovykh mikroaktyuatorov* (The Influence of Reinforcing a Polyimide Layer by Single-walled Carbon Nanotubes on the Thermal Deformation Characteristics of Polyimide/Silicon Beams of Thermal Microactuators), *Materialovedenie*, 2011, no. 9, pp. 43–46 (in Russian).
7. **Ebefors T.** *Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers*, Ph. D. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000, 144 p.
8. **Kozlov D. V., Smirnov I. P.** *Funktsional'nye vozmozhnosti univer-sal'nykh datchikov na osnove termomekhanicheskikh aktyuatorov* (The Performance Characteristics of the Multifunctional Sensors Based on Thermo-mechanical Actuators), *Innovatsii i Investitsii*, 2013, no. 5, pp. 191–193 (in Russian).
9. **Kozlov D. V., Smirnov I. P.** *Mikrosistemnyi emkostnoi datchik izmereniya fizicheskikh velichin* (Microsystem Capacitive Sensor for Measuring Physical Quantities), RF Patent 2541415, MPK2014 G01D5/24, B81B7/02. Byull. Izobter., no. 4, 2015 (in Russian).
10. **Zhukov A. A.** *Fiziko-tekhnologicheskie osnovy polucheniya poliimidnykh struktur dlya mikroelektronnykh ustroystv, ustroystv mikro-mekhaniki i mikrosensoriki* (Physical and Technological Fundamentals of Manufacturing Polyimide Structures for Microelectronic Devices, Micromechanical Devices, and Microsensors), D. Sc. (Eng.) Thesis, Moscow, 2003 (in Russian).
11. **Korpukhin A. S., Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Babaevskii P. G.** *Vliyanie uslovii formirovaniya i tolshchiny sloev na termodeformatsionnye kharakteristiki poliimid-kremnievykh uprugosharnirnykh balok teplovykh aktyuatorov* (Influence of the Conditions of Formation and the Thickness of Layers on the Thermal Deformation Characteristics of Polyimide Silicon Elastic-hinged Beams of Thermal Actuators), *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2011, no. 2, pp. 34–40 (in Russian).
12. **Veselago V. G., Zhukov A. A., Korpukhin A. S., Kapustyan A. V., Lavrishchev V. P.** *Sposob izgotovleniya metamateriala (varianty)* (A Method for Manufacturing a Metamaterial (Versions)), RF Patent 2522694, MPK2014 H01Q1/38. Byull. Izobter., no. 20, 2014 (in Russian).
13. **Datta M., Osaka T., Schultze J. W. (Eds.).** *Microelectronic Packaging*. CRC Press, Boca Raton, 2005, 542 p.
14. **Kozlov D. V., Smirnov I. P., Zhukov A. A., Chashchukhin V. G., Gradetsky V. G., Bolotnik N. N.** *Mikrosistemnyi kosmicheskii robot-inspektor (varianty)* (Microsystem Space Inspector Robot (versions)),

RF Patent 2566454 MPK2015 B25J11/00, B64G 4/00. Byull. Izobter., no. 30, 2015 (in Russian).

15. Smirnov I. P., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Zhukov A. A. *Mikrosistemnoe ustroystvo upravleniya poverkhnost'yu dlya krepleniya malogabaritnoi anteny* (Microsystem Device for Control of the Surface for Mounting a Compact Antenna), RF Patent 2456720, MPK2012 H01Q 1/28. Byull. Izobter., no. 20, 2012 (in Russian).

16. Erdem E. Y., Chen Y. M., Mohebbi M., Darling R. B., Böhrringer K. F., Suh J. W., Kovacs G. T. A. Thermally Actuated Omnidirectional Walking Microrobot, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 433–442 (in Russian).

17. Källvesten E., Ebefors T., Mattsson J. U., Stemme G. A Walking Silicon Micro-robot, *The 10th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, Sendai, Japan, 1999, pp. 1202–1205.

18. Smirnov I. P., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Korpukhin A. S., Babaevsky P. G. *Teplovoi mikromekhanicheskii aktyuator i sposob ego izgotovleniya* (Thermal Micromechanical Actuator and a Technology for Manufacturing it), RF Patent 2448896, MPK2012 B81B 3/00, B81C 1/00, B81B 7/00, Byull. Izobter., no. 12, 2012 (in Russian).

19. Khandpur R. S. *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Assembly*. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, 2005, 704 p.

УДК 621.865.8:62-231

DOI: 10.17587/mau.17.239-244

О. Д. Егоров, канд. тех. наук, доц., egorovod@yandex.ru, М. А. Буйнов, аспирант, mak5273@yandex.ru, Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Структурный анализ механизмов мехатронных и робототехнических устройств

Предложен новый метод структурного анализа механизмов мехатронных устройств и роботов. Представлены формулы для аналитического определения числа избыточных и метрических связей, лишней подвижностей и лишней звеньев, возникающих в контурах механизмов. Показаны примеры структурного анализа механизмов и способы устранения выявленных избыточных связей, лишней подвижностей и лишней звеньев, а также метрических связей.

Ключевые слова: механизм, структурный анализ, избыточная связь, лишняя подвижность, метрическая связь, подвижность, степень подвижности

Введение

Мехатронные и робототехнические устройства находят широкое применение в различных областях техники [1–5].

Одним из важных этапов разработки мехатронных и робототехнических устройств является проектирование их механизмов, которые представляют собой системы твердых тел, подвижно связанных между собой различными видами связей, реализующие управляемые двигательные функции, т. е. осуществляющие преобразования управляемого движения одного или нескольких тел системы в требуемые управляемые движения других тел.

Под связями в механизмах понимают кинематические пары (КП), т. е. подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев. Каждая КП обладает определенной подвижностью.

Все КП можно условно разделить на пассивные и активные. Пассивная КП (в дальнейшем просто КП) — соединение двух звеньев, не позволяющее осуществлять заданное управляемое движение одного звена пары относительно другого. Активная КП (степень подвижности) позволяет сообщать одному из звеньев пары управляемые обобщенные координаты. Степень подвижности (СП) включает в себя приводы, сообщаемые движения звену пары.

КП и СП имеют различную физическую сущность, и на структурных и кинематических схемах СП изображают иначе, нежели КП, но близкими к ним условными графическими изображениями [6].

Конструирование механизмов начинается с их структурного анализа. Основная задача такого анализа состоит в нахождении и устранении избыточных контурных связей (связей, которые не уменьшают подвижность механизма, а лишь обращают его в статически неопределимую систему [7]) (ИКС), лишней контурной подвижности (возможностей звена поворачиваться вокруг своей продольной оси или нескольких звеньев — вокруг их общей оси, не оказывая влияния на функциональные возможности механизма) (ЛКП), лишней звеньев (звеньев, которые не оказывают влияния на его функциональные возможности, но влияют на качество работы) (ЛЗ) и метрических связей (связей, которые повторяют ограничения на относительные движения звеньев в механизме [8]) (МС).

Существующие методы структурного анализа не всегда позволяют корректно определять ИКС, ЛКП механизма, а ЛЗ и МС до настоящего времени не определяли [9, 10]. Поэтому предлагается иной подход к структурному анализу механизмов, позволяющий гарантированно их определять, для рационального конструирования механизмов мехатронных и робототехнических устройств.

Структурные формулы механизмов

Аналитическую зависимость между подвижностью механизма и его структурными параметрами называют структурной формулой.

Первая структурная формула для плоских механизмов была предложена в 1869 г. П. Л. Чебышевым [8]:

$$W = 3n - \sum_{i=4}^5 (i-3)p_i,$$

где W — число подвижностей механизма; n — число подвижных звеньев механизма; i — класс кинематических пар ($i = 4$ — для высших кинематических пар; $i = 5$ — для низших кинематических пар); p_i — число кинематических пар i -го класса.

Позднее подобные формулы для плоских механизмов были получены М. Грюблером и А. Клейном.

Для пространственных механизмов используют формулу А. П. Малышева

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i. \quad (1)$$

Подвижность механизма указывает на то, сколько управляемых обобщенных координат необходимо задать, чтобы привести механизм в управляемое движение, т.е. сколько необходимо установить приводов. Приводы устанавливают в СП. В общем случае СП может сообщать механизму несколько подвижностей. Общее число СП механизма предлагаем определять по формуле

$$H = n - \sum_{j=1}^K A_j,$$

где A_j — показатель числа звеньев контура, значения которого

- для многоконтурных механизмов

$$A_j = \begin{cases} 2, & \text{если контур состоит из двух и более подвижных звеньев, принадлежащих только данному контуру;} \\ 1, & \text{если контур включает в себя одно звено, принадлежащее только данному контуру;} \end{cases}$$

- для механизмов, содержащих один контур,

$$A_j = \begin{cases} 2, & \text{если контур состоит из трех и более подвижных звеньев;} \\ 1, & \text{если контур состоит из двух подвижных звеньев.} \end{cases}$$

Часто путают понятия "подвижность механизма" и "степень свободы тела". Подвижность механизма — число управляемых обобщенных координат. Степень свободы тела — это независимое возможное его движение. Тело, находящееся в пространстве, не может иметь число степеней свободы, большее шести, в то время как подвижность механизма не ограничена. Например, тело, закрепленное в захватном устройстве робота, не может иметь число степеней свободы, большее шести, в то время как исполнительный механизм робота может иметь подвижность больше шести.

Таким образом, для реализации движения твердого тела в пространстве с заданным числом степеней свободы подвижность механизма должна быть равна или больше числа степеней свободы тела.

Для определения подвижности механизмов, содержащих ИКС, Л. Н. Решетов ввел в структурную формулу Малышева член S , учитывающий число ИКС всего механизма:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + S. \quad (2)$$

В выражении (2) два неизвестных параметра — W и S . Поэтому для анализа механизма необходимо каким-либо образом определить один из них.

В настоящее время число ИКС определяют, принимая W из рассмотрения структурной схемы механизма: в простых механизмах интуитивно, на основе опыта конструктора или геометрических соображений, в сложных механизмах — путем исследования функций положения звеньев [11] (в большинстве случаев принимают $W = 1$), по формуле

$$S = W - 6n + \sum_{i=1}^5 ip_i. \quad (3)$$

Такой подход является трудоемким, субъективным и не всегда достоверным. Он не гарантирует корректного нахождения числа ИКС.

Зависимость (3) дает возможность при известном W определить только общее число ИКС всего механизма. Но он может состоять из нескольких замкнутых контуров, и каждый контур может обладать некоторым числом ИКС. Эта формула не позволяет их определить и правильно устранить.

Поэтому предлагается новая методика определения числа ИКС и ЛКП в механизме. Плоский замкнутый контур механизма, образованный КП только 5-го класса, обладает тремя ИКС. Если в замкнутом контуре кроме КП 5-го класса могут быть КП 4-го, 3-го, 2-го или 1-го классов, т.е. контур может иметь дополнительные подвижности, то число ИКС такого контура меньше, чем у плоского. В общем случае число ИКС j -го контура механизма предлагаем определять по формуле

$$S_j = 3 - \sum_{i=1}^5 (m-i)p_i,$$

где p_i — число КП i -го класса замкнутого контура, которые не были рассмотрены до этого в других контурах; m — модификатор, учитывающий тип КП:

$$m = \begin{cases} 5 & \text{— для низших кинематических пар (5-, 4- и 3-го классов);} \\ 4 & \text{— для высших кинематических пар (2- и 1-го классов).} \end{cases}$$

Отрицательные значения S_j указывает на то, что появились ЛКП.

Наличие ИКС и ЛКП в структурной схеме указывает на тот факт, что механизм обладает структурной избыточностью:

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K S_j, \quad (4)$$

где K — число независимых контуров механизма, определяемое по формуле Х. И. Гохмана [11]

$$K = \sum_{i=1}^5 p_i - n.$$

Для определения подвижности пространственных механизмов, содержащих ИКС и ЛКП, предлагаем использовать формулу (1) с учетом соотношения (4):

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + S_{\Sigma}.$$

Устранение ИКС осуществляют понижением класса КП контура, устранение ЛП — повышением их класса [12, 13].

Кроме ИКС и ЛП контуры механизма могут содержать лишние звенья. Таким звеном в кулачковом механизме с вращающимся толкателем может быть ролик 2 (рис. 1, а).

Он предназначен для замены трения скольжения между кулачком 1 и толкателем 3 на трение качения, т.е. для улучшения процесса взаимодействия кулачка и толкателя. Если в механизме применить тарельчатый толкатель (рис. 1, б), то его функциональные возможности не изменятся по сравнению с механизмом на рис. 1, а, но ухудшатся качественные показатели его работы за счет повышенного трения скольжения.

Таким образом, с точки зрения структуры механизма ролик 2 является лишним звеном. В общем случае число лишних звеньев в j -м контуре механизма предлагаем определять по формуле

$$Z_j = \sum_{i=1}^5 (5 - m)p_i. \quad (5)$$

Формула (5) применима только для контуров, состоящих из трех и более подвижных звеньев. В контуре, состоящем из двух подвижных звеньев, не может быть ЛЗ, так как минимальное число подвижных звеньев, образующих замкнутый контур, равно двум.

В замкнутых контурах механизмов, содержащих пары только 5-, 4- и 3-го классов, могут появиться метрические связи, которые возникают при установке дополнительного звена в контуре механизма. Например, на рис. 2, а в механизме для увеличения жесткости установлено дополнительное звено AB , при этом его размер должен быть равен размеру звена CD , а также необходимо, чтобы $MA = AC = DB = BH$. В противном случае механизм неработоспособен [11]. На рис. 2, б в винтовой механизм добавлена направляющая 3, которая предотвращает поворот гайки 2 вместе винтом 1. При этом оси звеньев 1 и 3 должны быть параллельны между собой, иначе произойдет заклинивание.

При структурном анализе механизмов число T_j метрических связей j -го контура предлагаем определять по формулам:

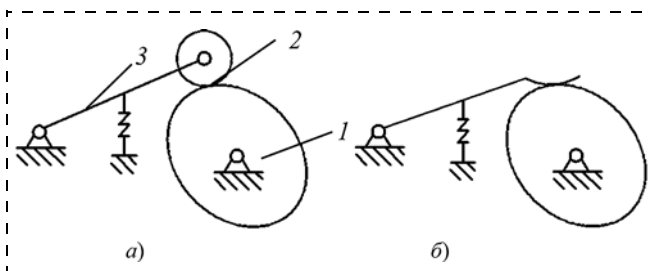


Рис. 1. Кулачковый механизм

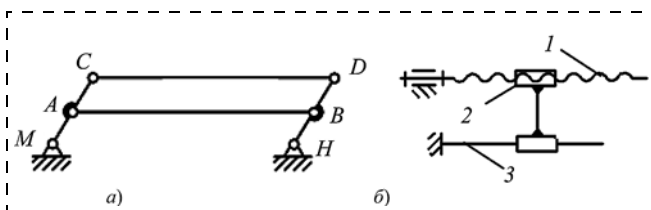


Рис. 2. Механизмы с метрическими связями

- для механизмов, содержащих один замкнутый контур,

$$T_j = 0,5 \left(\frac{2,5 - n_k}{|2,5 - n_k|} + 1 \right), \quad (6)$$

где n_k — число подвижных звеньев замкнутого контура;

- для механизмов, содержащих несколько замкнутых контуров,

$$T_j = 0,25 \left(1 - \frac{n_k - 3,5}{|n_k - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - n'_k}{|1,5 - n'_k|} + 1 \right), \quad (7)$$

где n'_k — число подвижных звеньев замкнутого контура, не входящих в другие контуры.

Формулы (6) и (7) применимы для расчета контуров, образованных КП 5-, 4- и 3-го классов. Если в контуре содержится хотя бы одна пара 2- или 1-го класса, то такой контур метрических связей не имеет.

Метрические связи в структуре механизма являются дополнительными. Погрешности изготовления звеньев и сборки механизма МС могут привести к его заклиниванию. При проектировании следует использовать структурные схемы механизмов, не содержащие метрических связей.

Наличие ЛЗ и МС в механизме указывает на то, что он обладает конструктивной избыточностью, которую предлагаем определять по зависимости

$$C_{\Sigma} = \sum_{j=1}^K T_j - \sum_{j=1}^K Z_j.$$

Окончательно подвижность плоских и пространственных механизмов с учетом ИКС, ЛКП, ЛЗ и МС рекомендуем определять по формуле

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + S_{\Sigma} + C_{\Sigma}.$$

Примеры структурного анализа исполнительных механизмов мехатронных и робототехнических устройств

Приведем пример структурного анализа исполнительного механизма робота [14] (рис. 3, *a*).

Исполнительный механизм состоит из семи подвижных звеньев, двух сферических пар третьего класса D_3 и E_3 , имеющих по три вращательных подвижности, одной цилиндрической пары четвертого класса D'_4 , имеющей одну вращательную и одну поступательную подвижности, и шести вращательных пар пятого класса $A_5, B_5, C_5, C'_5, D''_5, G_5$, имеющих по одной подвижности.

Найдем число замкнутых контуров исполнительного механизма:

$$K = 9 - 7 = 2.$$

Вычислим число избыточных связей, лишних подвижностей, лишних звеньев и метрических связей в контурах механизма. В первом контуре $B_5 C_5 D_5'' D_4'$ число избыточных связей равно

$$S_1 = 3 - (5 - 4) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 3 = 2.$$

Число метрических связей первого контура

$$T_1 = 0,25 \left(1 - \frac{4-3,5}{|4-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-4}{|1,5-4|} + 1 \right) = 0.$$

Число лишних звеньев первого контура

$$Z_1 = (5 - 5) \cdot 4 = 0.$$

Во втором контуре $C'_5 E_3 D_3 D''_5$ число избыточных контурных связей равно

$$S_7 = 3 - (5 - 3) \cdot 2 - (5 - 5) \cdot 1 = -1.$$

Отрицательное значение S_2 указывает на тот факт, что имеется лишняя контурная подвижность, т.е. возможность звена E_3D_3 проворачиваться вокруг своей продольной оси симметрии, не оказывая влияния на функциональные возможности исполнительного механизма робота. Число метрических связей второго контура

$$T_2 = 0,25 \left(1 - \frac{4-3,5}{|4-3,5|} \right) \left(\frac{1,5-2}{|1,5-2|} + 1 \right) = 0.$$

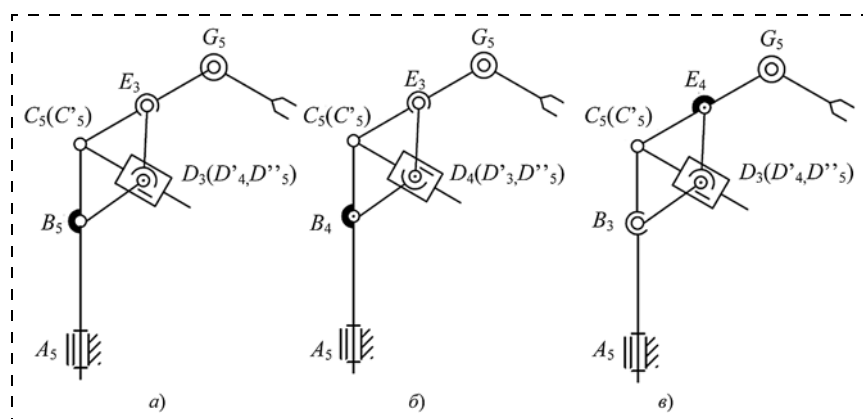


Рис. 3. Исполнительный механизм робота

Число лишних звеньев второго контура

$$Z_2 = (5 - 5) \cdot 3 = 0.$$

Структурная избыточность механизма

$$S_{\Sigma_i} = 2 - 1 = 1.$$

Конструктивная избыточность механизма

$$C_{\Sigma} = 0 - 0 = 0.$$

Вычисляем подвижность исполнительного механизма робота:

$$W = 6 \cdot 7 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 1 - 5 \cdot 6 + 1 = 3.$$

Число степеней подвижности механизма

$$H = 7 - 2 \cdot 2 = 3.$$

Для приведения механизма в управляемое движение необходимо установить три привода вращательного движения в кинематических парах A_5 , D_5' и G_5 .

Устраним избыточные контурные связи и лишние подвижности. Для этого в первом контуре понизим класс двух кинематических пар, например, B_5 заменим на B_4 и D_4' заменим на D_3' , а во втором контуре повысим класс одной кинематической пары, т. е. D_3 заменим на D_4 (рис. 3, б).

В этом случае число избыточных связей первого $B_4 C_5 D_5'' D_3'$ и второго C_5', E_3, D_4, D_5'' контуров будет равно

$$S_1 = 3 - (5 - 3) \cdot 1 - (5 - 4) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 3 = 0;$$

$$S_2 = 3 - (5 - 3) \cdot 1 - (5 - 4) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 1 = 0.$$

При этом подвижность исполнительного механизма робота останется прежней:

$$W = 6 \cdot 7 - 3 \cdot 2 - 4 \cdot 2 - 5 \cdot 5 = 3.$$

Устранить избыточные контурные связи и лишние контурные подвижности также можно, заменяя в первом контуре B_5 на B_3 , а во втором контуре — E_3 на E_4 (рис. 3, в).

Таким образом, устранение избыточных контурных связей и лишних подвижностей является многовариантным процессом.

Проведен структурный анализ исполнительного механизма мехатронного захватного устройства робота (рис. 4, *а*).

Механизм захватного устройства состоит из пяти подвижных звеньев, двух пар второго класса B_2 и B'_2 и семи пар пятого класса A_5 , C_5 , C'_5 , F_5 , F'_5 , P_5 и P'_5 .

Найдем число замкнутых контуров механизма:

$$K = 9 - 5 = 4.$$

Вычислим число избыточных связей, лишних подвижностей, лишних звеньев и метрических связей в контурах механизма. В первом контуре $A_5B_2F_5$ число избыточных связей равно

$$S_1 = 3 - (4 - 2) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 2 = 1.$$

Метрических связей в первом контуре нет ($T_1 = 0$), так как он содержит пару второго класса. Первый контур состоит из двух подвижных звеньев, поэтому лишних звеньев в нем нет ($Z_1 = 0$).

Второй контур $A_5 B'_2 F'_5$ аналогичен первому контуру. Поэтому

$$S_2 = 1; T_2 = 0; Z_2 = 0.$$

В третьем контуре $F_5 C_5 P_5$ число избыточных контурных связей

$$S_3 = 3 - (5 - 5) \cdot 2 = 3.$$

Число метрических связей третьего контура

$$T_3 = 0,25 \left(1 - \frac{2 - 3,5}{|2 - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - 1}{|1,5 - 1|} + 1 \right) = 1.$$

Третий контур состоит из двух подвижных звеньев, поэтому $Z_3 = 0$.

Структурное исполнение четвертого контура $F'_5 C'_5 P'_5$ аналогично третьему контуру. Поэтому

$$S_4 = 3; T_4 = 1; Z_4 = 0.$$

Структурная избыточность механизма

$$S_{\Sigma} = 1 + 1 + 3 + 3 = 8.$$

Конструктивная избыточность механизма

$$C_{\Sigma} = 1 + 1 - 0 = 2.$$

Вычисляем подвижность механизма:

$$W = 6 \cdot 5 - 5 \cdot 7 - 2 \cdot 2 + 8 + 2 = 1.$$

Число степеней подвижности механизма

$$H = 5 - 4 \cdot 1 = 1.$$

Для приведения механизма захватного устройства в управляемое движение необходимо установить привод вращательного движения M (рис. 4).

Для устранения избыточных контурных связей механизма заменим пары B_2 и B'_2 на пары B_1 и B'_1 , а пары F_5, P_5, F'_5 и P'_5 — на пары F_4, F'_4, P_4 и P'_4 . Для устранения метрических связей механизма заменим звенья $C_5 P_5$ и $C'_5 P'_5$ на структурные группы с цилиндрическими парами K_4 и K'_4 (рис. 4, б). Тогда число избыточных связей в контурах будет равно

$$S_1 = 3 - (4 - 1) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 2 = 0.$$

$$S_2 = 3 - (4 - 1) \cdot 1 - (5 - 5) \cdot 2 = 0.$$

$$S_3 = 3 - (5 - 4) \cdot 3 = 0.$$

$$S_4 = 3 - (5 - 4) \cdot 3 = 0.$$

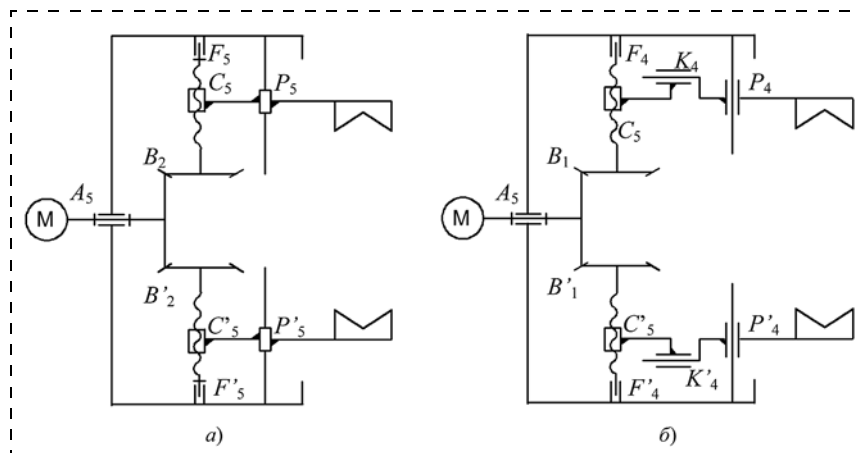


Рис. 4. Исполнительный механизм захватного устройства

Число метрических связей третьего и четвертого контуров

$$T_4 = 0,25 \left(1 - \frac{3 - 3,5}{|3 - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - 2}{|1,5 - 2|} + 1 \right) = 0.$$

$$T_3 = 0,25 \left(1 - \frac{3 - 3,5}{|3 - 3,5|} \right) \left(\frac{1,5 - 2}{|1,5 - 2|} + 1 \right) = 0.$$

Подвижность нового механизма

$$W = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 3 - 4 \cdot 6 - 2 \cdot 1 = 1.$$

Число степеней подвижности нового механизма

$$H = 7 - 2 \cdot 2 - 2 \cdot 1 = 1.$$

Заключение

Предложенный метод структурного анализа механизмов робототехнических и мехатронных устройств дает возможность определять число избыточных и метрических связей, лишних подвижностей и лишних звеньев каждого замкнутого контура, а также число степеней подвижности механизма и его подвижность. Применение данного метода позволяет конструировать механизмы без структурной и конструктивной избыточности, что облегчает их сборку, уменьшает трение и износ в кинематических парах, улучшает условия функционирования механизмов. Это обеспечивает высокое качество работы механической части мехатронных и робототехнических устройств.

Список литературы

1. Григорьев С. Н., Кутин А. А., Долгов В. А. Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2014. № 3. С. 8—14.
2. Егоров О. Д., Буйнов М. А. Проектирование мехатронного модуля захватного устройства робота с преобразователем движения реечного типа // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2013. № 2. С. 8—12.
3. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Расчет и конструирование мехатронных модулей: учеб. пособ. М.: ГОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2012. 422 с.

4. Sherry D., Kolk R. *Mechatronic Systems design*: International Thompson Publications. Boston: Brooks Cole, 1998.
5. Bolton W. *Mechatronics*. 3-rd ed. N. Y.: Addition-Wesley Longman Ltd, 2003.
6. Егоров О. Д. Прикладная механика робототехнических устройств: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2014. 372 с.
7. Решетов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. М.: Машиностроение, 1979. 334 с.
8. Гушин В. Г., Балтаджи С. А., Соболев А. Н., Бровкина Ю. И. Проектирование механизмов и машин: учеб. пособ. для вузов. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 488 с.
9. Hwang W.-M., Hwang Y.-W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints // *Mechanism and Machine Theory*. 1992. Vol. 27, N. 2. P. 189–199.

10. Srinath J., Krishnamurty S. Modified standard codes in enumeration and automatic sketching of mechanisms // *Proc. of 4th Appl. Mech. Robotics Conf.* Cincinnati, OH. 1995.
11. Механика машин: учеб. пособие для вузов / И. И. Вульфсон, М. Л. Ерихов, М. З. Коловский и др.; Под ред. Г. А. Смирнова. М.: Высш. шк., 1996. 511 с.
12. Егоров О. Д. Структурный анализ механизмов мехатронных устройств // *Вестник МГТУ "СТАНКИН"*. 2012. № 2. С. 16–19.
13. Егоров О. Д. Прикладная механика мехатронных устройств: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", 2013. 229 с.
14. Егоров О. Д. Конструирование механизмов роботов. М.: Абрис, 2012. 443 с.

Structural Analysis of the Mechanisms of the Mechatronic and Robotic Devices

O. D. Egorov, egorovod@yandex.ru✉, M. A. Buynov, mak5273@yandex.ru,
Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, 127055, Russian Federation

Corresponding author: Egorov Oleg D., Ph. D., Associate Professor
of the Robotic and Mechatronics Sub-department of MSTU STANKIN,
Moscow, 127055, Russian Federation, e-mail: egorovod@yandex.ru

Received on October 20, 2015

Accepted on November 11, 2015

The article presents a new method of a structural analysis of the mechanisms in the mechatronic devices and robots, and formulas for analytical determination of the structural and constructive redundancy mechanism. The structural redundancy mechanism includes excessive contour connection, turning it into a statically indefinable system of extra contour and mobility (the ability of the link to rotate around its longitudinal axis or several links around their common axis, without affecting the functionality of the mechanism). The contour excessive communication can lead to an increased friction in the kinematic pairs or deformation of the links in the assembly, while the extra mobility contours lead to unnecessary design complexity of a mechanism. The constructive redundancy mechanism includes unnecessary links (the links, which do not affect its functionality, but influence the quality of its operation) and metric connections (the links, which duplicate the restrictions on the relative motion of the links in the mechanism). The excessive units increase the cost of a mechanism, while the metric connection can lead to blocking in case of inaccuracies in the manufacture of the links. The article presents examples of a structural analysis of the mechanisms and ways of elimination of the identified redundant links, the extra mobility and extra links, and metric connections. The proposed method of the structural analysis of mechanisms, robotic and mechatronic devices enables one to define a number of redundant and metric relationships, the extra mobility and extra links of each closed contour, and the degrees of freedom of a mechanism and its mobility. Application of this method allows us to design mechanisms without the structural redundancy, which facilitates the assembly process, reduces friction and wear in the kinematics pairs, and improves functioning of the mechanisms. This ensures high quality of the mechanical parts of the mechatronic and robotic devices.

Keywords: mechanism, structural analysis, redundant links, extra mobility, metric connection, mobility, degree of mobility.

For citation:

Egorov O. D., Buynov M. A. Structural Analysis of the Mechanisms of the Mechatronic and Robotic Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 239–244.

DOI: 10.17587/mau/17.239-244

References

1. Grigor'ev S. N., Kutin A. A., Dolgov V. A. *Printsipy postroyeniya tsifrovyykh proizvodstv v mashinostroyenii* (The principles of digital industries in the engineering), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2014, no. 3, pp. 8–14 (in Russian).
2. Egorov O. D., Buynov M. A. *Proektirovanie mekhatronnogo modulya zakhvatnogo ustroystva robota s preobrazovatelem dvizheniya rechnogo tipa* (Designing mechatronic module of the grasp of the robot with the Converter of movement lath type), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2013, no. 2, pp. 8–12 (in Russian).
3. Egorov O. D., Poduraev Yu. V. *Raschet i konstruirovaniye mekhatronnykh moduley* (Calculation and design of mechatronic modules), Moscow, GOU VPO MGTU "STANKIN", 2012, 422 p. (in Russian).
4. Shetty D., Kolk R. *Mechatronic Systems design*: International Thompson Publications, Boston, Brooks Cole, 1998.
5. Bolton W. *Mechatronics*, N. Y., Addition-Wesley Longman Ltd, 2003.
6. Egorov O. D. *Prikladnaya mekhanika robototekhnicheskikh ustroystv* (Applied mechanics of robotic devices), Moscow, FGBOU VPO MGTU "STANKIN", 2014, 372 p. (in Russian).
7. Reshetov L. N. *Samoustanyavlyayushchiesya mekhanizmy* (Self-aligning mechanisms), Moscow, Mashinostroyeniye, 1979, 334 p. (in Russian).
8. Gushhin V. G., Baltadzi S. A., Sobolev A. N., Brovkin Ju. I. *Proektirovanie mekhanizmov i mashin* (The design of mechanisms and machines), Staryj Oskol, TNT, 2014, 488 p. (in Russian).
9. Hwang W.-M., Hwang Y.-W. Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints, *Mechanism and Machine Theory*, 1992, vol. 27, no. 2, p. 189–199.
10. Srinath J., Krishnamurty S. Modified standard codes in enumeration and automatic sketching of mechanisms, *Proc. of 4th Appl. Mech. Robotics Conf.*, Cincinnati, OH, 1995.
11. Vul'fon I. I., Erikhov M. L., Kolovskiy M. Z. et al. *Mekhanika mashin* (Mechanics of machines), G. A. Smirnov ed., Moscow, Vyssh. shk., 1996, 511 p. (in Russian).
12. Egorov O. D. *Strukturnyy analiz mekhanizmov mekhatronnykh ustroystv* (Structural analysis of the mechanisms of mechatronic devices), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2012, no. 2, pp. 16–19 (in Russian).
13. Egorov O. D. *Prikladnaya mekhanika mekhatronnykh ustroystv* (Applied mechanics mechatronic devices), Moscow, FGBOU VPO MGTU "STANKIN", 2013, 229 p. (in Russian).
14. Egorov O. D. *Konstruirovaniye mekhanizmov robotov* (Construction machinery robots), Moscow, Abris, 2012, 443 p. (in Russian).

Е. Н. Тарасов, д-р техн. наук, нач. отдела¹, проф.², entarasov@mail.ru,

¹Научно-производственный центр автоматизации и приборостроения им. академика Н. А. Пилюгина, г. Москва,

²Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА)

Управление в эргатических распределенных системах обработки данных

Эргатическая распределенная система обработки данных, построенная на вычислительной сети, рассмотрена как объект управления для достижения максимального быстродействия. Сформулирован общий подход к управлению такой системой, представлены основные положения по реализации управления состоянием системы и управления процессом обработки данных.

Ключевые слова: эргатическая распределенная система, объект управления, оптимизация по времени работы, средства управления

Постановка задачи

Рассматривается эргатическая распределенная система обработки данных (ЭРСОД), в которой используется единая база данных, хранящая первичные данные и результаты их обработки. Обработка осуществляется на единичных автоматизированных рабочих местах (АРМ), либо параллельно в группе АРМ.

ЭРСОД построена на вычислительной сети (ВС) с централизованными вычислительными и информационными ресурсами, т.е. это система с применением технологии "тонкий клиент — толстый сервер", в которой присутствуют: сервер данных, сервер приложений и рабочие станции персонала — АРМ.

По условиям применения ЭРСОД может работать в нескольких режимах (штатном, тестовом, учебном и пр.) как с использованием соответствующих для каждого режима баз данных (БД), так и без БД. В последнем случае предусматривается ручной ввод всех необходимых данных для получения конечного результата.

Обработка данных в ЭРСОД проводится путем решения информационно-вычислительных задач (ИВЗ), среди которых различаются:

- задачи, носящие автономный характер, решение которых не связано с другими ИВЗ ни информационно, ни организационно;
- задачи, решаемые в определенных последовательностях, называемых технологическими цепочками обработки данных (ТЦОД). Таких цепочек может быть конечное множество. Число ИВЗ в цепочке отражает глубину обработки данных и определяется целевой задачей для конкретного случая применения.

Каждая ИВЗ реализуется в виде самостоятельного программного изделия. Рабочие места, на которых осуществляется решение ИВЗ, группируются по функциональному назначению, т.е. разные типы АРМ предназначены для решения определенных групп ИВЗ, и при выполнении технологической цепочки обработка данных может переходить от одной группы АРМ к другой. Таким образом, процесс обработки данных может состоять из нескольких стадий, выполнение которых осуществляется на разных группах АРМ. В информатике такие системы носят название многостадийных [1].

К ЭРСОД могут предъявляться различные требования в зависимости от ее назначения. Выделим из этого множества два требования:

- переход в процессе работы от режима к режиму без прерывания работы;
- минимизация времени обработки данных.

Изменение режима связано с изменением состояния системы, которое определяется совокупностью значений ее переменных параметров.

Эффективное функционирование ЭРСОД при наличии изложенных требований может быть обеспечено путем управления системой, т.е. придания ей способности определенным образом в заданном направлении и временных границах реагировать на управляющие воздействия.

Управление ЭРСОД должно обеспечивать:

- изменение состояния системы за минимальное время для получения условий применения, наилучшим образом отвечающих назначению системы, т.е. решению ИВЗ обработки данных;
- минимизацию времени процесса обработки данных;
- устойчивость к внешним и внутренним возмущениям на всех этапах работы системы.

Здесь под устойчивостью эргатической системы будем понимать способность выполнять свои функции при возникновении внешних и внутренних возмущений. К внешним возмущениям относятся такие, источники которых находятся вне системы и которые не связаны непосредственно с процессом обработки данных (отсутствие или некондиционность исходных данных, разрушительные последствия несанкционированного доступа или вирусной атаки и пр.). К внутренним возмущениям относятся: отказ технических средств, неработоспособность отдельных компонентов программного обеспечения, нарушение работоспособности и целостности баз данных, ошибки операторов и др.

Общий подход к управлению ЭРСОД

В качестве объекта управления в ЭРСОД выступает совокупность технических и программных средств, информационного обеспечения и персонала, выполняющая работу по назначению [2]. Управляемость такой системе может придать контур управления, который включает в себя субъект управления (лицо, выполняющее управление — ЛВУ) и средства управления (технические, программные и информационные). На рис. 1 показана

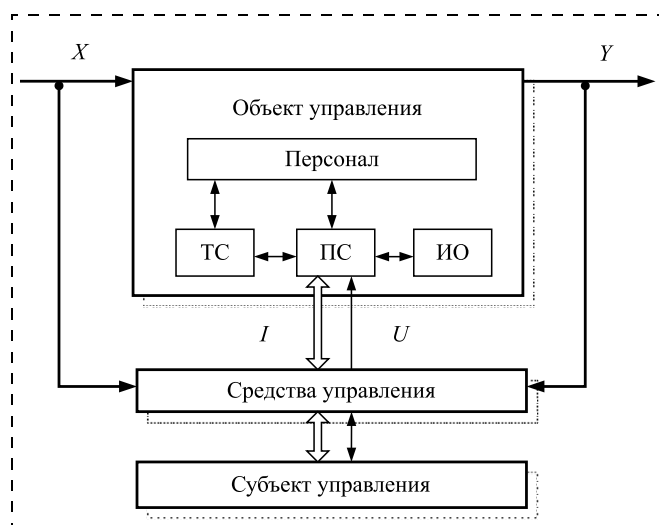


Рис. 1. Общая схема управляемой эргатической системы

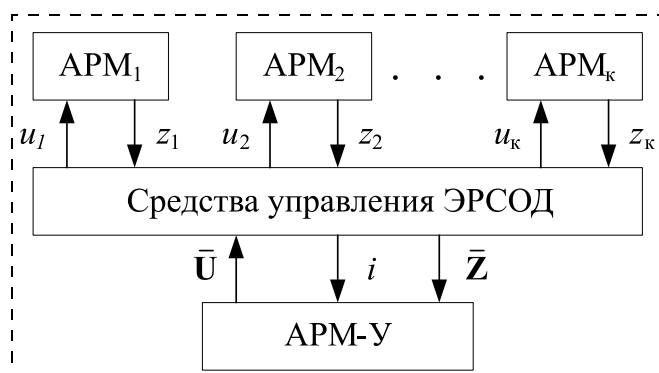


Рис. 2. Схема многоканального управления ЭРСОД

в общем виде схема ЭРСОД, являющаяся объектом управления.

На вход ЭРСОД подается входное воздействие X в виде массива данных, которые в результате обработки в системе преобразуются в выходной массив Y . В отличие от автоматической системы управления техническим объектом управляющее воздействие U в эргатической системе выдается не системой управления, а субъектом управления (ЛВУ) в виде некоторых команд, сообщений или действий с помощью имеющихся программных и технических средств. Через программные средства системы происходит также двухсторонний информационный обмен между объектом и субъектом управления I (рис. 1), на основании которого субъект управления принимает необходимые управленческие решения и формирует управляющие воздействия.

Источниками информации для этих решений являются входные воздействия на систему X и выходное состояние Y , а также информация I , характеризующая в текущий момент времени состояние технических и программных средств и ЭРСОД в целом.

Следует отметить, что каждый пользователь из числа персонала, выполняющего функции системы по назначению, несет на себе в управлении ЭРСОД еще и функции исполнительного органа, реализующего управляющие воздействия со стороны ЛВУ. Таким образом, управляющее воздействие можно рассматривать в векторном представлении U , где каждый элемент вектора u_j ($j = 1, k$) является управляющим воздействием, адресованным пользователю j , работающему на АРМ $_j$:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_k),$$

где k — число АРМ из состава ЭРСОД, применяемых в данный момент времени.

Отсюда следует, что каждое управление u_j осуществляется по своему информационному каналу j между ЛВУ и пользователем АРМ $_j$, по которому от ЛВУ к АРМ $_j$ идут управляющие воздействия u_j , а от АРМ $_j$ к ЛВУ — сигналы обратной связи z_j . На рабочем месте управления (АРМ-У) ЛВУ концентрируется вся информация о выданных управляющих воздействиях U , результатах их исполнения Z и об общем состоянии системы I , что позволяет субъекту управления оценивать ситуацию, принимать управленческие решения и их реализовывать. Схему управления ЭРСОД в этом случае можно представить так, как показано на рис. 2.

Реализация такого многоканального управления осуществляется соответствующими средствами управления ЭРСОД, которые разрабатываются для каждой конкретной системы.

Подход к управлению ЭРСОД как к системе с обратной связью позволяет ставить и решать задачу оптимизации времени работы в разных условиях функционирования системы, в том числе как при изменении ее состояния, так и при обработке данных [3].

Управление состоянием ЭРСОД применяется на этапах перехода от одного состояния к другому. В устойчивом состоянии система выполняет решение задач по назначению, а переход к новому состоянию определяется необходимостью начать решение иных задач, отличных от решавшихся в предыдущем состоянии, в силу различных причин.

Под состоянием ЭРСОД понимается упорядоченная совокупность переменных параметров, внутренних и внешних, определяющих свойства системы и ход процессов, происходящих в ней (например, режим работы, применяемая БД, состав используемых АРМ, состав решаемых ИВЗ и пр.) [4].

В основу управления для перевода ЭРСОД из одного установившегося состояния в другое может быть положена поведенческая модель системы, отражающая в фазовом пространстве параметров состояния все возможные переходы по изменению состояния. Эта модель носит детерминированный характер и может быть описана как конечное множество состояний системы C_s и соответствующее ему множество операторов перехода A_r^q из одного состояния в другое. В свою очередь, каждому оператору A_r^q ставится в соответствие набор процедур pr_v , приводящих к качественным изменениям системы и состоящих из действий d_u , которые выполняются автоматически или пользователями на рабочих местах и реализуют составную часть процедуры для каждого АРМ [4].

Учитывая детерминированный характер всех приведенных составляющих поведенческой модели системы, можно говорить о программной функции эргатического управления изменением состояния ЭРСОД, в качестве которой принимается оператор перехода A_r^q , у которого каждая процедура имеет нормативное время выполнения.

На рис. 3 показано графическое представление программного управления ЭРСОД при переходе системы из состояния C_r в состояние C_q путем последовательного выполнения процедур pr_1, pr_2, pr_v с соответствующими нормативными временами $t_{pr1}, t_{pr2}, t_{prv}$.

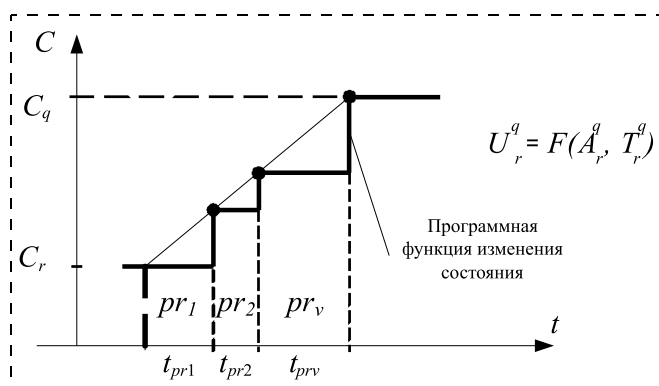


Рис. 3. Графическое представление программного управления состоянием

Процессы обработки данных осуществляются в установившемся состоянии ЭРСОД. Задачи управления при этом состоят в организации этих процессов с минимизацией времени обработки, что является одним из критериев эффективности такой системы. Достижению соответствующего результата препятствуют определенные сложности, а именно:

- эргатический характер системы, где действия персонала могут в значительной степени определять быстродействие ее функционирования;
- распределенный характер системы, который осложняет взаимодействие ее удаленных объектов;
- особенность ЭРСОД как объекта управления, в котором изначально нет эффективных средств управления.

Проблема оптимизации времени подготовки данных может быть сформулирована следующим образом: множество входных данных должно быть обработано ИВЗ в составе технологических цепочек на разнородных АРМ таким образом, чтобы в совокупности весь процесс обработки данных занимал минимальное время.

Оптимальное управление процессом обработки данных при такой постановке может быть представлено в виде

$$U_i^* = \arg \min t(U, X^*, X_i^{pr}, R_i, T_{ивз}^H),$$

где t — время выполнения задач обработки данных; U — множество векторов управляющих воздействий; X^* — вектор технических характеристик ЭРСОД, выбранный в результате проектирования системы; X_i^{pr} — вектор технических характеристик, применяемый в конкретном случае решения; R_i — вектор параметров, характеризующих ограничения и условия применения; $T_{ивз}^H$ — вектор нормативных времен решения ИВЗ на АРМ.

Решение проблемы управления, обеспечивающего минимизацию времени обработки данных в ЭРСОД, лежит в области организации вычислительного процесса в вычислительной сети. Добиться желаемого результата здесь возможно путем такой организации этого процесса, при которой распределение ИВЗ на рабочие места (АРМ), используемые для обработки данных, позволяло бы получить минимальное время решения в целом. Организовать вычислительный процесс в вычислительной сети нужным образом можно, определив для каждого АРМ системы состав и последовательность выполнения ИВЗ. Совокупность таких последовательностей для всех АРМ ЭРСОД дает расписание решения ИВЗ в сеансе работы. Если это расписание составить таким образом, что при всех действующих условиях и ограничениях будет достигаться максимальное быстродействие обработки данных по всей системе, то такое расписание следует использовать в качестве программной функции управления ЭРСОД. В этом случае в качестве управления U

здесь выступает многопараметрическая функция расписания $S(t)$. При этом задача нахождения программной функции управления в форме расписания по целому ряду признаков является близкой к задачам планирования, решаемым в *ERP*-системах (системах управления ресурсами предприятий) [5]. Практически она решается методами теории расписаний, позволяющими получить в зависимости от объема входных данных и имеющегося времени на составление расписания оптимальное $S_{\text{опт}}(t)$ или квазиоптимальное $S_{\text{опт}}^*(t)$ расписание обработки данных [1].

Средства управления ЭРСОД

Представленные два вида управления ЭРСОД являются независимыми друг от друга, так как их применение не может совпадать по времени — они используются на разных этапах работы системы. Поэтому в основе управления ЭРСОД лежит парадигма использования нескольких контуров управления, каждый из которых применяет для характерного этапа работы соответствующий метод.

Реализуется управление ЭРСОД программными средствами управления, которые размещаются как на централизованном вычислительном ресурсе (сервере) сети, так и на функциональных АРМ. Программные средства субъекта управления (лица, выполняющего управление) реализуют для каждого контура свои управляющие воздействия в виде программных функций и дополнительных команд, обеспечивающих устойчивость системы. Программные средства пользовательского управления предназначены для исполнения этих управляющих воздействий.

Управление ЭРСОД включает в себя также информационное обеспечение, в котором можно выделить неизменяемую консервативную часть (описание системы, поведенческая модель системы и пр.) и оперативную часть, используемую для формирования, накопления и обработки временных данных в процессе работы.

Заключение

Управление эргатической распределенной системой обработки данных для обеспечения минимизации времени обработки может быть построено как многоконтурное на основе программных функций, в качестве которых выступают поведенческая модель и оптимальное расписание выполнения информационно-вычислительных задач. Формирование управляющих воздействий осуществляется лицом, выполняющим управление, а их реализация — персоналом системы.

Список литературы

1. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. М.: Наука, 1989. 328 с.
2. Тарасов Е. Н. Автоматизированная система обработки данных как объект управления // Тр. ФГУП "НПЦАП". 2011. Вып. 2 (16). С. 28—36.
3. Тарасов Е. Н., Румянцев Г. Н. Оптимальное управление автоматизированной системой обработки данных // Тр. ФГУП "НПЦАП". 2014. Вып. 3 (29). С. 14—19.
4. Тарасов Е. Н., Васенькина Н. Н. Использование поведенческой модели для управления состоянием информационной системы // Тр. ФГУП "НПЦАП". 2012. Вып. 4 (22). С. 3—12.
5. Загидуллин Р. Р. Вопросы выбора и внедрения систем управления производством классов MES, APS, ERP. URL: www.tadviser.ru (дата обращения 24.01.2011).

Ergatic Distributed Data-Processing Systems Control

E. N. Tarasov, entarasov@mail.ru✉, Federal State Unitary Enterprise "Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and instrument-making", Moscow, 117342, Russian Federation, Moscow State University of Radio-Engineering Electronics and Automation, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: Tarasov Evgeniy N., D. Sc., Head of Department, Professor, Federal State Unitary Enterprise "Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and instrument-making", Moscow, 117342, Russian Federation, Moscow State University of Radio-Engineering Electronics and Automation, Moscow, 119454, Russian Federation e-mail: entarasov@mail.ru

Received on December 24, 2015

Accepted on December 29, 2015

This paper presents a review of ergatic distributed data-processing system (EDDPS) based on network with Centralized computing and informational resources. According to application conditions, EDDPS is able to operate in several modes (regular, testing, training etc.) either with existing database (DB) or without it. There should be manual input to get the final result in the second option. Data processing in EDDPS is done by solving informational-computing task (ICT) including both standalone tasks and tasks consequently solved in technological handling data chain (THDC). Every ICT is a self-realized software product. Automated Workstations (AWS) are provided for data processing in EDDPS, functionally grouped ICTs are being solved on these workstations. The following requirements are imposed to the system: non-interrupted transition process between different modes and minimized data-processing time. EDDPS's efficiency may be ensured by the way of system control, i.e. provide with a capability to respond to control actions in a certain way, specific direction and timeframe. EDDPS control must ensure changing of the state in the shortest period of time to get the circumstances best for ICT solution; minimization

data-processing time; steadiness to internal and external perturbations during the all system operation steps. Complex of technological and software resources, informational security and staff is the management object of EDDPS. It's covered by control loop which includes management subject (decision maker — DM) and management tools (technical, software and informational). Such approach enables to solve the time-minimizing problem for operation system both with data processing and with its state changing. EDDPS mode control is connected with adjustments of system parameters characterizing its functionality (e. g. Operating mode, used DB, AWS composition, ICT structure etc.) and must ensure the transformation from one steady state to another. Behavioral model reflecting all possible mode transformations may be used as management foundation. Data processing control is done in a current state in aim of time minimization of the data reduction to increase the speed of system functionality in total. Minimum of time may be achieved for the relevant system class by using the program monitoring function which can be presented by schedule of ICT decisions on chosen AWS. Presented two control modes are independent as their usability may be mistiming — as they are used on the different steps of the system operation. The basis of EDDPS control is the paradigm of several control loops usage each of which realizes method requisite for the exact step. Controlled functionality EDDPS with minimized data processing time is realized by software utilities and informational management support.

Keywords: Ergatic distributed data-processing system (EDDPS), network, database (DB), informational-computing task (ITC), technological handling data chain (THDC), automated workstations (AWS), data processing, decision maker (DM)

For citation:

Tarasov E. N. Ergatic Distributed Data-Processing Systems Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 245—249.

DOI: 10.17587/mau/17.245-249

References

1. **Tanaev V. S., Sotskov Ju. N., Strusevich V. A.** *Teoriya raspisanij. Mnogostadijnye sistemy* (Schedule Theory. Sequential Systems), Moscow, Nauka, 1989, 328 p. (in Russian).

2. **Tarasov E. N.** *Avtomatizirovannaja sistema obrabotki dannyh kak object upravlenija* (Automated data-processing system as a control object), Proc. of FSUE "Academician Pilyugin Scientific-production

Center of Automatics and instrument-making", 2011, no. 2 (16), pp. 28—36. (in Russian).

3. **Tarasov E. N., Rumjancev G. N.** *Optimal'noe upravlenie avtomatizirovannoj sistemoj obrabotki dannyh* (Optimal control of automated data-processing system). Proceedings of FSUE "Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and instrument-making", 2014, no. 3 (29), pp. 14—19. (in Russian).

4. **Tarasov E. N., Vasen'kina N. N.** *Ispol'zovanie povedencheskoj modeli dlja upravlenija sostojaniem informacionnoj sistemy* (Usage of Behavior model to control the state of informational system), Proc. of FSUE "Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and instrument-making", 2012, no. 4 (22), pp. 3—12. (in Russian).

5. **Zagidullin R. R.** *Voprosy vybora i vnedrenija sistem upravlenija proizvodstvom klassov MES, APS, ERP* (Aspects of selection and implementation of manufacturing control systems MES, APS, ERP), available at: www.tadviser.ru (date of access 24.01.2011).

УДК 621.865:004.896

DOI: 10.17587/mau.17.249-253

В. А. Карташев, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., проф., kart@list.ru,

А. А. Богуславский, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

С. М. Соколов, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. сектором,

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Обеспечение безопасности работы оператора методом разделения рабочих зон робота и человека¹

Обеспечение безопасности оператора в рабочей зоне робота методом выделения области работы каждого из них сводится к контролю непересечения границы между указанными областями. Сравнение возможностей существующих технических средств решения этой задачи позволяет сделать вывод о том, что наиболее удобными в использовании являются системы, построенные на основе СТЗ. Для обозначения линии границы в них предлагается использовать мигающие светодиодные модули. Результаты экспериментов показывают, что такое решение обеспечивает высокую надежность обнаружения пересечения границы в большом диапазоне условий освещенности.

Ключевые слова: безопасность совместной работы с роботом, система технического зрения, метод разделения рабочих зон

Введение

Необходимость обеспечения безопасности работы человека в рабочей зоне манипуляционного робота является основной проблемой, которая сдерживает развитие новых направлений манипуляци-

онных технологий: в строительстве, космонавтике, медицине. Накопленная к настоящему времени статистика десятилетнего использования медицинских робототехнических комплексов "Да-Винчи" в США [1] свидетельствует о существенной доле опасных инцидентов, произошедших в процессе эксплуатации. Опасные и фатальные ситуации имели место не только для оперируемого больного, но и для медицинского персонала, который нахо-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-08-01012-а).

дился рядом с установкой. К ним относятся непроизвольные движения, которые совершали манипуляторы во время работы, и ошибочные движения оператора-хирурга излишне большой амплитуды. Потенциальная угроза появления таких движений создает психологический дискомфорт.

Проблема обеспечения безопасности работы человека в рабочей зоне манипулятора возникла одновременно с появлением роботизированных технологий. В процессе обучения и настройки роботизированного комплекса оператор находится рядом с манипулятором. Высокая квалификация персонала, который выполняет эти работы, позволяет максимально снизить риски возникновения травм. В новых областях применения манипуляторов квалификация персонала оказывается недостаточной для того, чтобы заблаговременно выявить опасности в работе манипулятора.

Наибольшую безопасность обеспечивают такие технические решения, которые исключают перемещение манипулятора в рабочую зону человека. При этом в рабочей зоне манипулятора выделяется область, в которой работает человек и не допускается манипулятор. В настоящее время на рынке отсутствуют специализированные устройства для решения этой задачи. Рассмотрим некоторые из них.

Ограждающие конструкции

Для разделения зон работы человека и манипулятора часто используются ограждающие конструкции. Достоинствами такого решения являются:

- хорошая видимость границы рабочей зоны человека;
- хорошая защищенность работающего, если ограждающая конструкция является достаточно прочной.

Недостатки состоят в следующем:

- затруднено использование ограждающих конструкций для областей со сложной конфигурацией границы;
- достаточно трудно быстро изменить положение границы в соответствии с новыми условиями задачи;
- невозможность полностью исключить случайного или преднамеренного попадания человека в рабочую область манипулятора.

Рассмотрим некоторые особенности использования ограждающих конструкций подробнее.

При достаточной прочности ограждающие конструкции обеспечивают практически полную безопасность работы человека рядом с манипулятором. Однако это достоинство сильно сужает область их применения, так как достаточно трудно становится быстро изменить границу между рабочими зонами. Например, при настройке оборудования робототехнического комплекса положение рабочей зоны человека определяется текущими условиями задачи. Поэтому существенные затраты времени на уста-

новку защитных приспособлений могут послужить причиной отказа от них хотя бы в некоторых случаях.

Существенным недостатком ограждающих конструкций является невозможность исключить попадание человеком за устанавливаемую ими границу. Недостатком также является возможность поломки манипулятора или его рабочих органов при ударе об ограждение.

Инфракрасные датчики отраженного сигнала

Электронные средства контроля пересечения границы позволяют обеспечить большую гибкость как при задании линии границы, так и выборе действий при ее пересечении. Промышленностью выпускается несколько видов устройств, которые предназначены для контроля границы. Одним из них является инфракрасный поверхностный извещатель [2]. Он формирует инфракрасную зону контроля в виде двух плоскостей (рис. 1). Устройство принимает сигнал, отраженный от инфракрасной подсветки охраняемой линии. Если в зону действия прибора попадает какой-либо объект, то отраженный сигнал усилится. Как только он превысит заданный при обучении уровень, устройство формирует извещение о несанкционированном доступе.

Наличие двух плоскостей позволяет определять направление движения объекта. Это свойство дает возможность реализовать такой алгоритм контроля доступа, при котором обеспечивается вход человека в рабочую зону манипулятора и невозможность выхода за ее пределы манипулятора. Компактность рассматриваемого устройства делает работу с ним удобной, так как позволяет оперативно менять местоположение границы рабочих зон, подстраивая ее положение под требования задачи.

Основным недостатком рассматриваемого устройства является трудоемкость настройки порога срабатывания. Подстраивать порог необходимо всякий раз при изменении линии границы. Существенные трудности создает также невидимость для человеческого глаза границы контролируемой области вследствие того, что извещатель работает в инфракрасном диапазоне волн.

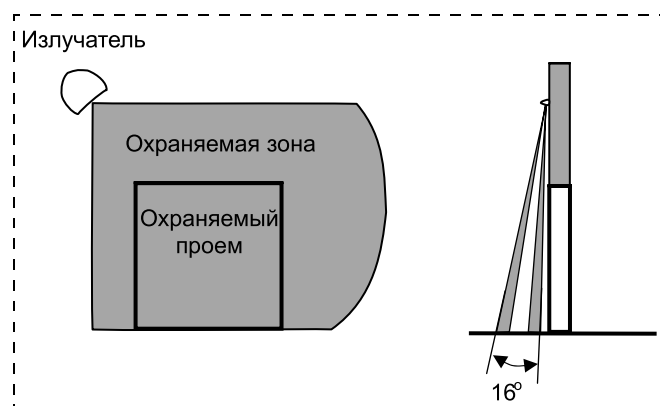


Рис. 1

Датчики, работающие на просвет

Устройство контроля границы рабочей зоны может быть построено на основе световых штор безопасности. Такие шторы производит японская фирма OMRON (рис. 2) [3]. Штора содержит линейный светодиодный излучатель видимого диапазона световых волн и линейный фотоприемник. В рабочем положении свет от излучателя должен быть направлен в сторону фотоприемника. Пересечение предметом плоскости между излучателем и фотоприемником приводит к тому, что сигнал от одного из фотоприемников становится меньше заданного порога. Устройство контроля световой шторы информирует систему управления об этом. Как излучатель, так и фотоприемник смонтированы в корпусе, который имеет вид столбика.



Рис. 2

Для удобства работы со световой шторой целесообразно смонтировать излучатель и фотоприемник на общей направляющей, которая позволяет устанавливать необходимое расстояние между ними, и снабдить направляющую ножками. Использование нескольких световых штор делает возможным выделение области, которая имеет границу в виде ломаной линии. Пара таких устройств, расположенных параллельно, позволяет определять направление пересечения границы.

Основными неудобствами при использовании световых штор является сравнительно большая высота устройства, вследствие чего их легко опрокинуть при случайном задевании. Кроме того, световые шторы не предполагаются мобильными. Наличие проводов мешает их быстрому перемещению и работе с ними.

Контроль границы рабочей зоны с помощью системы технического зрения

Использование для контроля границы системы технического зрения дает два преимущества: позволяет наблюдать сцену большого размера и реализовать программную обработку изображения.

Критическими параметрами такой системы являются время обработки кадра и надежность выделения линии границы при всех допустимых условиях освещенности.

В работе рассматривается система контроля линии границы, в которой видеокамера установлена таким образом, чтобы граница между рабочими областями манипулятора и человека постоянно находилась в поле ее зрения [4]. На рис. 3 приведена структурная схема взаимодействия системы технического зрения и системы управления манипуляционным роботом. Система технического зрения автоматически распознает при обучении положение линии границы и при нарушении ее передает сигнал системе управления манипулятором. При поступлении такого сигнала система управления аварийно останавливает манипулятор.

Имеющиеся на рынке системы технического зрения являются узкоспециализированными по типу задач, для решения которых они предназначены. Например, упомянутая фирма OMRON выпускает около 10 типов специализированных систем технического зрения для решения конкретных задач контроля на производстве. Ни одна из них не предназначена для контроля линии границы областей. Такая ситуация не позволяет использовать в рассматриваемой задаче готовые решения. Настоящее исследование ставит своей целью выработку способа контроля линии границы, включающего в себя:

- определение способа обозначения линии границы;
- разработку способа ввода в систему технического зрения местоположения линии границы;
- разработку критериев определения пересечения границы системой технического зрения.

Разнообразие вариантов кооперативной работы человека и манипулятора (настройка робототехнического комплекса и оперативное обслуживание технологического оборудования в процессе работы)

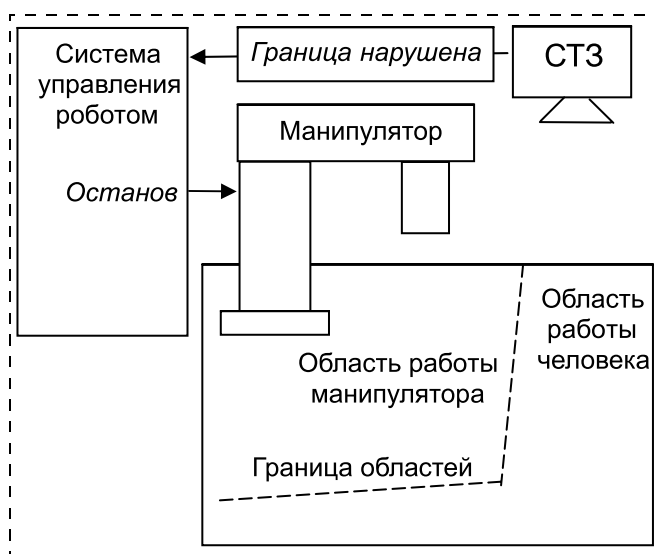


Рис. 3

обуславливает выбор такого способа указания границы, который позволяет быстро изменять ее положение, легко визуально определяется как человеком, так и системой технического зрения при любых условиях освещенности.

Требуемое решение не может быть получено только программными средствами обработки изображения, так как связано с простотой и удобством задания линии границы и восприятия ее органами зрения.

В качестве указателя линии границы были опробованы линейные объекты трех типов: 1) лента с градиентными признаками закрашки (в том числе ограничительные ленты безопасности с чередованием белых и красных полос); 2) гирлянда с априорно известной формой и цветом бусин; 3) светодиодные ленты и гирлянды; 4) светодиодные модули.

Система контроля с мигающими светодиодами

Наилучшие результаты были получены с помощью светодиодных модулей. Каждый модуль является автономным устройством, содержащим яркий мигающий светодиод. Эксперименты позволили установить, что такие светодиоды обеспечивают надежное определение положения границы при достаточно больших изменениях уровня освещенности рабочего места. Это связано с тем, что светодиод обнаруживается по изменениям на последовательных кадрах яркости изображения. В надежности метода нетрудно убедиться непосредственным сравнением изображений, приведенных на рис. 4 (см. вторую сторону обложки). Рис. 4, *а* соответствует условиям освещенности при рассеянном свете в помещении; рис. 4, *б* — при сильной боковой засветке искусственным источником освещения; рис. 4, *в* — при затемнении в помещении. В левой части рис. 4 светодиод погашен, в правой — зажат. Горящий светодиод виден на кадре как область с ярко-красными или засвеченными пикселями. Когда светодиод погашен, их яркость становится существенно меньшей.

Частота колебаний яркости мигающих светодиодов около 3 Гц, скважность близка к 1. Равенство длительности фаз колебаний яркости делает возможным обнаружение мигания за промежуток времени, который незначительно превышает полупериод. Этого промежутка времени достаточно для того, чтобы обнаружить свечение светодиода (это означает, что он не закрыт посторонним предметом) и убедиться, что яркость его изменяется (т.е. пиксел изображения принадлежит мигающему светодиоду).

При частоте мигания 3 Гц полупериод равен $1/6$ с. При частоте развертки 25 Гц изменения состояния светодиода ("горит — не горит" и "не горит — горит") можно установить по пяти кадрам, т. е. за 0,2 с. Если светодиод закрыт посторонним предметом, то на всех пяти кадрах изменения яркости окажутся незначительными.

Для того чтобы указать границу зоны работы манипулятора, оператор раскладывает вдоль нее

светодиодные модули и дает системе технического зрения команду запомнить указанную линию. Затем система технического зрения определяет период и скважность мигания светодиодов. Обе эти величины определяются с достаточно большой точностью в силу того, что частота следования кадров видеокамеры почти на порядок больше частоты мигания светодиодов. Запоминаются также координаты мигающих пикселей. После получения команды окончания обучения система управления переходит в режим контроля новой линии границы.

Контроль пересечения границы реализуется в соответствии со следующим алгоритмом. Система технического зрения определяет расстояние (в пикселях) от каждой мигающей точки, запомненной при обучении, до ближайшей мигающей точки на изображении наблюдаемой сцены. Если хотя бы для одной из них расстояние окажется больше допустимого, то делается вывод о том, что имело место пересечение границы. Если расстояние между всеми мигающими точками не превышает заданной величины, то принимается, что граница не нарушена.

Посторонний предмет может попасть в рабочую зону незамеченным только в том случае, если его скорость достаточна для того, чтобы за промежуток времени 0,2 с он успел пересечь границу.

Рассмотрим пример. В конструкции манипулятора РМ-01 наименьшие размеры имеет запястье (90×90 мм). Система технического зрения способна обнаружить пересечение им границы только, если его скорость не превышает 450 мм/с. Полученная оценка позволяет сделать вывод о том, что время реакции системы технического зрения на пересечение границы достаточно для обеспечения безопасности оператора в таких операциях, как позиционное обучение от ручного пульта управления и отработка технологических движений, так как скорость перемещения рабочего органа в них обычно достаточно мала.

Заключение

Разделение рабочих зон манипулятора и оператора является одним и часто используемых способом обеспечения безопасной работы человека в рабочей зоне манипулятора. Это разделение может быть выполнено с помощью существующих устройств: ограждающих конструкций и электронных систем доступа с датчиками инфракрасного и видимого светового диапазона. Решениям, которые с их помощью могут быть реализованы, присущи отдельные недостатки, связанные с особенностями конструкции этих устройств: к ним относятся неудобство задания сложной линии границы или трудоемкость перенастройки устройства.

Использование для контроля системы технического зрения позволяет получить устройство с простым и гибким управлением. Одним из компонентов такой системы является устройство индикации границы. В работе предложено использовать в качестве

него яркие мигающие светодиодные модули. Эксперименты показали, что такое решение позволяет упростить обучение системы технического зрения и обеспечить надежный контроль в широком диапазоне изменений освещенности рабочего места.

Список литературы

1. Alemzadeh H., Iyer R. K., Kalbarczyk Z., Leveson N., Raman J. Adverse Events in Robotic Surgery: A Retrospective Study of 14 Years

of FDA Data // Proc. of 50-th Annual Meeting of The Society of Thoracic Surgeons. Orlabdo, Florida, USA. 2014.

2. Извещатель охранной поверхности оптико-электронный ИО309-19 "ИКАР-Ш". Руководство по эксплуатации СПНК.425152.008 РЭ ЗАО. "Аргус-Спектр". С. 37.

3. Каталог продукции OMRON. Системы безопасности. URL: http://www.industrial.omron.ru/ru/products/catalogue/motion_and_drivers/robots/default.html.

4. Карташев В. А., Богуславский А. А., Карташев В. В., Ярошевский В. С., Михасеку С. В. Задачи управления манипуляционным роботом для обеспечения безопасности перемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 1. С. 28—32.

Maintenance of Safety in Man-robot Co-working Operations by the Highlighted Area Method

V. A. Kartashev, leading research fellow, kart@list.ru,

A. A. Boguslavsky, leading research fellow, angb74@mail.ru,

S. M. Sokolov, head of laboratory, sokoplsm@list.ru

Keldysh institute for Applied Mathematics of RAS, 125047, Miusskaya sq, 4, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Kartashev Vladimir A., leading research fellow, Keldysh institute for Applied Mathematics of RAS, 125047, Miusskaya sq, 4, Moscow, Russian Federation
e-mail: kart@list.ru

Received on October 28, 2015

Accepted on November 06, 2015

The problem of safety restrains spreading of man-robot co-working technologies. The paper investigates the applications in which staff works in robot work area.

They include repairing, testing and adjustment procedures of technological equipment, manipulator and its programme of functioning. Particularity of these operations consists in frequent changing of operator activity points and the need to watch result of robot motions in close proximity to equipment, part or attachment fixed in manipulator jaws. Highlighted workspace method is one of the way to ensure the safety of worker. The method consists in restriction of robot movements in man working area. It can be realized by standard technical equipment such as mechanical enclosing structures, electronic access systems and light curtain devices. The investigation shows that they are not convenient in use because are not adapted for operational borderline changing. The comparison shows that systems which based on technical vision are better suited for such applications. They give more additional information to robot control system for flexibility selection of preprogrammed behavior when borderline intersection is detected. Highlighted workspace method includes two phases: marking of borderline between working areas and monitoring to prevent line intersection by robot or man. The means of borderline marking should support operative changing of borderline, simple teaching procedure of system technical vision and reliable detection in valid level of illumination. To satisfy above conditions special modules with blinking led lamps were developed. The paper describes procedure use of modules and gives results on detecting of their location in different brightness of backlighting.

Keywords: maintenance of safety in man-robot co-working operations, system of technical vision, the highlighted workarea method.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-08-01012-a.

For citation:

Kartashev V. A., Boguslavsky A. A., Sokolov S. M. Maintenance of Safety in Man-robot Co-working Operations by the Highlighted Area Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 249—253.

DOI: 10.17587/mau/17.249-253

References

1. Alemzadeh H., Iyer R. K., Kalbarczyk Z., Leveson N., Raman J. Adverse Events in Robotic Surgery: A Retrospective Study of 14 Years

of FDA Data, Proc. of 50-th Annual Meeting of The Society of Thoracic Surgeons, Orlabdo, Florida, USA, 2014.

2. Извещатель охранной поверхности оптико-электронный ИО309-19 "ИКАР-ШЧ" Руководство по эксплуатации СПНК.425152.008 РЭ ЗАО. "Аргус-Спектр". Р. 37. (Optic-electron protective annunciator IO309-19 "IKAR-SHCH" Manual SPNK.425152.008 RE ZAO. "Argus-Spectr". P. 37) (in Russian).

3. Каталог продукции OMRON. Системы безопасности. (OMRON. Protective systems) (in Russian), available at: http://www.industrial.omron.ru/ru/products/catalogue/motion_and_drivers/robots/default.html.

4. Kartashev V. A., Boguslavsky A. A., Kartashev V. V., Yaroshevsky V. S., Mikhaesku S. V. Zadachi upravleniya manipulyatsionnym robotom dlya obespecheniya bezopasnosti peremeshchenij (Problems of manipulator motions safety), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 28—32 (in Russian).

П. С. Коренев, аспирант, pkorenev92@mail.ru, **Ю. В. Митришкин**, д-р техн. наук, проф., yvm@mail.ru, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, **М. И. Патров**, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., michael.patrov@mail.ioffe.ru, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Реконструкция равновесного распределения параметров плазмы токамака по внешним магнитным измерениям и построение линейных плазменных моделей¹

Рассмотрено решение задачи идентификации (реконструкции) сложного динамического объекта с распределенными параметрами — плазмы в магнитном поле токамака — методами физики. Идентифицируются (восстанавливаются) равновесные распределения полоидального потока, тороидального тока и граница плазмы. Реконструкция проводится в темпе наблюдений по сигналам магнитной диагностики вне плазмы в дискретные моменты времени. По восстановленным равновесиям строятся линейные динамические модели плазмы в магнитном поле токамака. Разработанные алгоритмы реконструкции и построения линейных моделей применены к экспериментальным данным сферического токамака Глобус-М в программно-вычислительной среде MATLAB и графической среде виртуальных приборов LabVIEW. Показывается, как алгоритмы восстановления равновесия и управления формой плазмы, которые могут быть получены на основе линейных моделей, могут встраиваться в экспериментальный стенд реального времени для применения в физическом эксперименте токамака.

Ключевые слова: идентификация, токамак, реконструкция равновесия плазмы, распределенные параметры, форма плазмы, полоидальный поток, тороидальный ток, линейные динамические модели, стенд реального времени

Введение

К настоящему времени в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза по-прежнему продолжают лидировать аксиально симметричные тороидальные магнитные конфигурации (токамаки), предназначенные для удержания высокотемпературной плазмы в магнитном поле [1]. Токмаки прошли в своей эволюции путь от круглых в поперечном сечении токамаков с медными кожухами для демпфирования горизонтального движения плазмы и железными сердечниками до современных вытянутых по вертикали токамаков со значительно большим газокINETическим давлением [2] и воздушными центральными соленоидами без медных кожухов.

Родиной токамаков является Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова (СССР, г. Москва), в котором был построен первый токамак в 1956 г. Затем токамаки распространились по всему миру [3], и сейчас во Франции (г. Кадараш) сооружается первый экспериментальный термоядерный реактор — ITER².

В нашей же стране был впервые применен метод обратных связей для управления плазмой в магнит-

ном поле открытой магнитной ловушки [4], и этот метод получил широкое применение в токамаках для магнитного и кинетического управления плазмой. Современные токамаки проектируются и сооружаются совместно с системами управления, которые обеспечивают стабилизацию положения плазмы по большому радиусу и в вертикальном неустойчивом направлении, удерживают плазму вблизи первой стенки посредством стабилизации ее формы, создают профили распределения ее параметров: тока, температуры, давления, запаса устойчивости q .

В настоящее время в мире действует ряд вертикально вытянутых токамаков, на которых изучается физика высокотемпературной плазмы и проводятся исследования систем управления плазмой³. К таким наиболее прогрессивным токамакам можно отнести *DIIS-D* (США, 1986, 1,66; 0,67), *JET* (Великобритания, 1992, 3,00; 1,25—2,1), *JT-60U* (Япония, 1991, 3,40; 1,00), *TCV* (Швейцария, 1992, 0,88; 0,25—0,7), *ASDEX Upgrade* (Германия, 1991 1,65; 0,5—0,8), *EAST* (Китай, 2006, 1,75; 0,43), *KSTAR* (Южная Корея, 2008, 1,8; 0,5). В маркировках токамаков после названий стран их расположения указаны год ввода токамака в эксплуатацию, а также большой и малый радиусы в метрах соответственно.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00380А.

² www.iter.org

³ www.tokamak.info

В Российской Федерации с 1999 г. эксплуатируется сферический токамак Глобус-М (1999, 0,36; 0,24) [5] в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе, а также сооружается вытянутый по вертикали токамак Т-15 (2017, 1,48; 0,67) в Институте физики токамаков, НИЦ "Курчатовский институт" [6].

Для управления формой плазмы, т. е. расположением в пространстве границы плазмы, необходимо по магнитным измерениям вне плазмы восстанавливать распределение полоидального магнитного потока и положение сепаратрисы плазмы. На каждом действующем токамаке свой коллектив специалистов разработал алгоритм реконструкции равновесия плазмы и использует его в контуре обратной связи для управления формой плазмы [7], поскольку без такого алгоритма токамак с вытянутым сечением не способен функционировать. Например, на токамаке *DIID-D* применяется алгоритм *EFIT (Equilibrium FITting)* [8], который восстанавливает распределение потока и тока и дает возможность управлять потоками на сепаратрисе (*isoflux control*) [9, 10]. На токамаке *JET* применяется алгоритм *XLOC* [7, 11], позволяющий рассчитывать форму и положение плазмы, но не ее ток, и управлять зазорами между сепаратрисой и первой стенкой в фиксированных точках полоидального сечения [12].

В данной работе разрабатывается алгоритм восстановления равновесия плазмы для токамака Глобус-М в целях дальнейшего его использования для управления формой плазмы на данной установке, поскольку на ней применяются только два скалярных контура стабилизации горизонтального и вертикального положения плазмы [13]. Накопленный опыт реконструкции и управления формой плазмы на токамаке Глобус-М предполагается в дальнейшем использовать на токамаке Т-15.

По терминологии теории управления решаемая задача восстановления равновесия является задачей идентификации, т.е. задачей построения стационарной модели плазмы как объекта управления с распределенными параметрами по показаниям магнитной диагностики токамака в темпе наблюдений. Разработанный алгоритм реконструкции распределения параметров плазмы основан на итерационном решении дифференциального эллиптического уравнения

равновесия плазмы Града — Шафранова [3, 14, 15] в частных производных методом функций Грина. На основе восстановленных распределений плотности тороидального тока плазмы и полоидального потока строятся линейные динамические модели плазмы, которые могут быть применены для построения регуляторов формы, тока и положения плазмы. Для получения линейных моделей используются

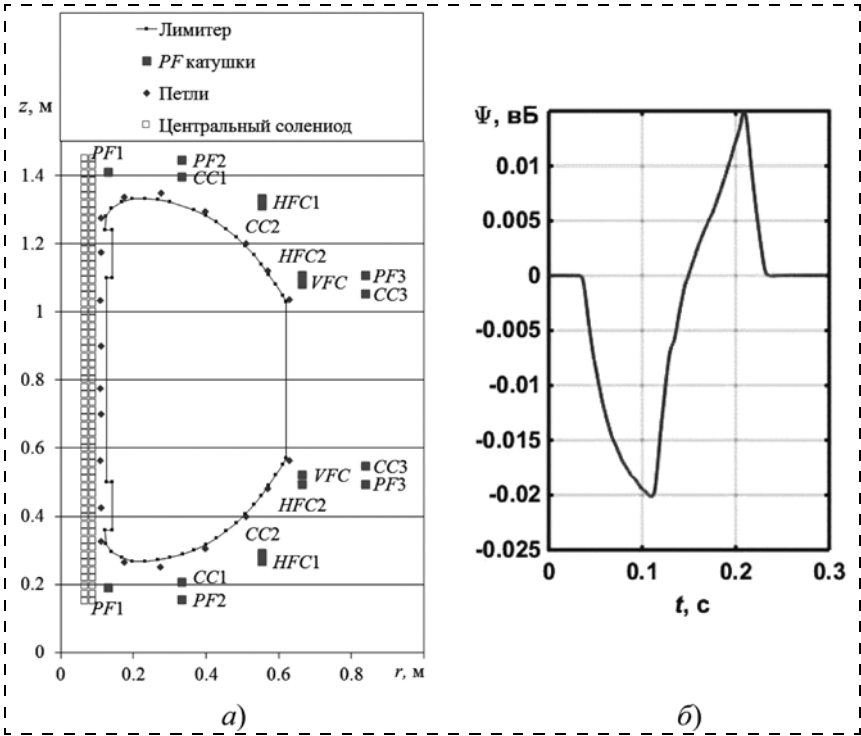


Рис. 1. Расположение катушек полоидального поля и магнитных петель в вертикальном сечении токамака ГЛОБУС-М (а); полоидальный поток на магнитной петле токамака в разряде № 31648 (б)

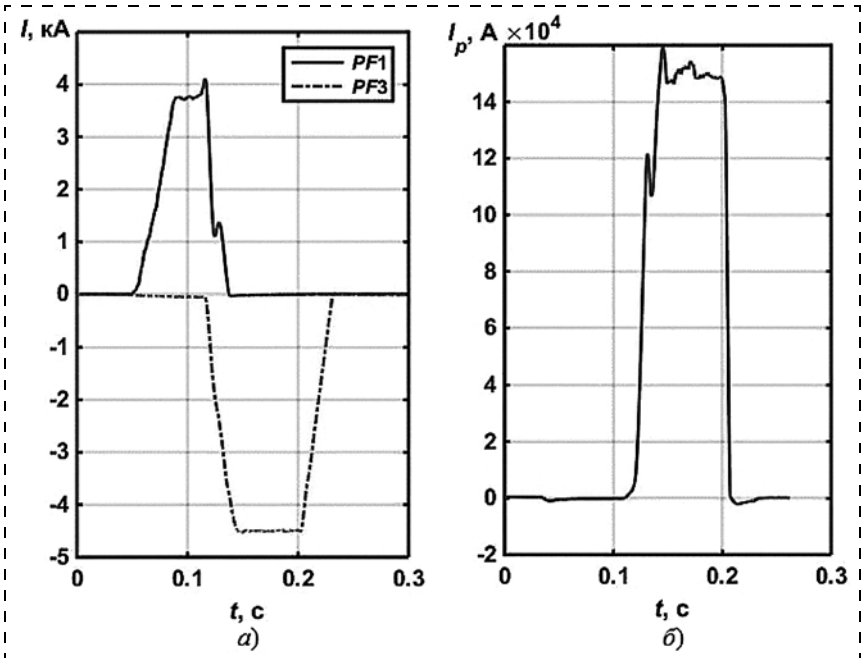


Рис. 2. Токи в обмотках PF1 и PF2 полоидального поля (а) и ток плазмы (б) в разряде № 31648

линеаризованные уравнения Кирхгофа для контуров тока плазмы и обмоток токамака с учетом уравнения баланса сил в плазме.

Задача идентификации в статье решается не с использованием продвинутых методов идентификации, например, метода подпространств [16, 17] или метода вейвлетов [18–20], а методом применения законов физики и знания физики плазмы в токамаках.

Полученные результаты могут быть применены в разработке систем магнитного управления плазмой с дальнейшим их внедрением в практику физического эксперимента посредством экспериментальных стендов реального времени [21].

Магнитная диагностика токамака Глобус-М основана на использовании 21 магнитной петли, которые измеряют магнитный полоидальный поток в различных точках пространства вокруг плазмы, и поясов Роговского, измеряющих полный ток плазмы, суммарный ток плазмы и ток по камере, а также токи в восьми полоидальных обмотках токамака. Расположение катушек полоидального поля, магнитных петель и элементов вакуумной камеры токамака Глобус-М представлены на рис. 1, а. Типичное показание магнитной диагностики — значение полоидального потока на магнитной петле — приведено на рис. 1, б; токи в основных обмотках управления токамака показаны на рис. 2, а, ток плазмы — на рис. 2, б.

1. Математическая постановка задачи идентификации

Равновесие плазмы в токамаке описывается распределением полоидального магнитного потока $\psi(r, z)$ в цилиндрической системе координат (r, φ, z) с учетом аксиальной симметрии плазмы. Полоидальный поток ψ в точке P определяется как магнитный поток на радиан горизонтальной окружности с центром на оси токамака, проходящей через точку P и ограничивающей площадь S (рис. 3):

$$\psi(P) = \frac{1}{2\pi} \int_{S(P)} \vec{B} d\vec{S},$$

где $\vec{B}$ — вектор индукции магнитного поля; $\vec{B} d\vec{S}$ — скалярное произведение индукции и нормали эле-

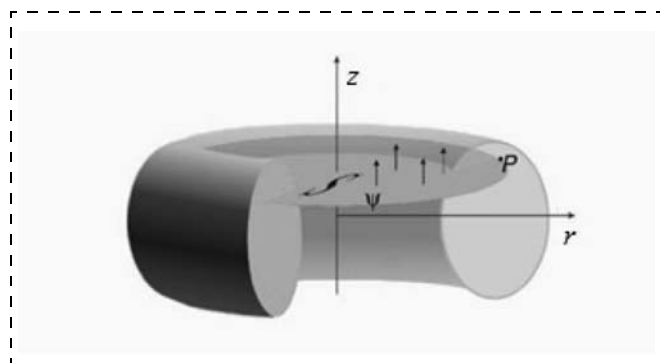


Рис. 3. Полоидальный поток в токамаке

мента поверхности. Из определения полоидального потока следует, что он должен обращаться в ноль на аксиальной оси и на бесконечности (граничные условия).

Граница плазмы (сепаратриса) в полоидальной плоскости (вертикальной плоскости, проходящей через ось z) может быть найдена как наибольшая замкнутая линия уровня полоидального потока [3, 14, 15, 22]. В случае, если сепаратриса касается камеры токамака, конфигурацию плазмы называют лимитерной. Если плазма не касается стенок токамака, то говорят, что плазма находится в диверторной фазе. Диверторная фаза также характеризуется наличием на сепаратрисе X -точки, в которой магнитное поле обращается в ноль. Сепаратриса имеет ветви, которые "входят" в первую стенку токамака или диверторные пластины. Вдоль этих ветвей из плазмы выходят примеси и поглощаются диверторными пластинами. Таким образом, для определения формы и положения магнитной оси плазмы достаточно найти распределение полоидального потока.

Из уравнений Максвелла в дифференциальной форме [23, 24]

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{B} &= \mu_0 \vec{J}, \\ \text{div } \vec{B} &= 0, \end{aligned}$$

где $\vec{J}$ — вектор плотности тока, μ_0 — магнитная постоянная, и аксиальной симметрии тороидальной плазмы

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$$

можно получить дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка, связывающее распределение плотности тороидального тока плазмы J_φ с распределением создаваемого им полоидального потока ψ [3, 15]:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\mu_0 r J_\varphi. \quad (1)$$

На основании (1) задачу стационарной идентификации (восстановления) равновесия плазмы можно сформулировать следующим образом.

Требуется найти область плазмы S , распределение тороидального тока J_φ в ней и создаваемое им распределение полоидального потока, удовлетворяющие уравнению (1) и ограничениям вида

$$\left(\iint_S J_\varphi dS - I_p \right)^2 \rightarrow \min_{J_\varphi};$$

$$\psi|_{r=0} = 0;$$

$$\psi|_{r=\infty} = 0;$$

$$(\psi(r_i, z_i) - \Psi_i)^2 \rightarrow \min_{J_\varphi}, \quad i = 1, \dots, M,$$

где I_p и Ψ_i — измеренные значения полного тока плазмы и полоидального потока на петлях, M — число измеряющих поток петель.

Поставленная задача является обратной некорректной краевой задачей, поскольку в ней нарушаются условия корректности по Ж. Адамару [25, 26]:

- 1) решение задачи всегда существует;
- 2) это решение единственно;
- 3) решение задачи зависит непрерывно от входных данных.

Используя уравнение (1), можно найти распределение полоидального потока при заданном распределении плотности тока плазмы, однако правая часть уравнения (1) неизвестна и должна быть найдена из других условий. Краевая задача является обратной, так как в задаче известно следствие, т. е. значения потока вне плазмы, а неизвестной является причина: распределение потока и тороидального тока плазмы. Более того, решение задачи не является единственным.

2. Алгоритм идентификации стационарной модели плазмы

Комбинируя уравнение (1) с условием баланса между силами Ампера магнитного поля и градиента давления в плазме

$$\nabla p = \vec{J} \times \vec{B},$$

можно получить уравнение Града — Шафранова [3, 14, 15], которому подчиняется равновесие плазмы в токамаке:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\mu_0 r^2 \frac{d}{d\psi} p(\psi) - \frac{1}{2} \frac{d}{d\psi} F^2(\psi),$$

где плотность тороидального тока плазмы J_ϕ выражена через газокINETическое давление плазмы p и функцию F , пропорциональную полоидальному току плазмы:

$$J_\phi = r \frac{d}{d\psi} p(\psi) + \frac{1}{2\mu_0 r} \frac{d}{d\psi} F^2(\psi).$$

Функции p и F также неизвестны, но зависят только от полоидального потока. Ввиду этого составляющие плотности тороидального тока плазмы J_ϕ могут быть аппроксимированы функциями полоидального потока:

$$\frac{d}{d\psi} p(\psi) = \sum_k^{n_p} c_k^p f_k^p(\psi),$$

$$\frac{d}{d\psi} F^2(\psi) = \sum_l^{n_F} c_l^F f_l^F(\psi).$$

Для решения задачи идентификации равновесия используется итерационный метод Пикара. На каждой итерации плотность тока плазмы аппроксимируется линейной комбинацией базисных функций $f(\psi)$ от полоидального потока, полученного на предыдущей итерации. Полоидальный поток в

этом случае вычисляется как сумма, определяемая выбранными базисными функциями:

$$\psi_n(\vec{r}) = \sum_{k=1}^{n_p} c_k^p \psi_{kn}^p(\vec{r}) + \sum_{l=1}^{n_F} c_l^F \psi_{ln}^F(\vec{r}) + \sum_{m=1}^N G(\vec{r}, \vec{r}_m) I_m,$$

где

$$\psi_{kn}^p(\vec{r}) = \iint_S r' G(\vec{r}, \vec{r}') f_k^p(\psi_{n-1}(\vec{r}')) dS',$$

$$\psi_{ln}^F(\vec{r}) = \iint_S \frac{1}{2\mu_0 r'} G(\vec{r}, \vec{r}') f_l^F(\psi_{n-1}(\vec{r}')) dS'.$$

Здесь G — функция Грина для уравнения (1), имеющая физический смысл полоидального потока в точке $\vec{r} = (r, z)$, создаваемого единичным бесконечно тонким кольцевым током с координатами $\vec{r}' = (r', z')$, распределение плотности тока которого имеет вид дельта-функции $\delta(\vec{r} - \vec{r}')$, и выражаемая через эллиптические интегралы первого рода K и второго рода E [27]:

$$G(\vec{r}_j, \vec{r}) = \mu_0 \frac{\sqrt{rr_j}}{\pi k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k^2) - E(k^2) \right];$$

$$k^2 = \frac{4rr_j}{(r+r_j)^2 + (z-z_j)^2}.$$

Коэффициенты c_k^p , c_k^F и токи в катушках I_m подбираются на каждой итерации через минимизацию суммы квадратов разностей между рассчитанными и измеренными токами и потоками

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M \left(\frac{\psi(\vec{r}_i, c_k^p, c_k^F, I_m) - \psi_i}{\sigma_i^\psi} \right)^2 + \left(\frac{I_p(c_k^p, c_k^F) - I_p^M}{\sigma_{I_p}} \right)^2 + \sum_{m=1}^N \left(\frac{I_m - I_m^M}{\sigma_{I_m}} \right)^2.$$

Здесь I_p и I_p^M — рассчитанный и измеренный полные токи плазмы; I_m^M — измеренные токи в обмотках токамака; σ_i^ψ , σ_{I_p} , σ_{I_m} — погрешности измерений полоидального потока, тока плазмы и тока в обмотках соответственно.

Можно пояснить метод решения дифференциального уравнения типа (1) посредством функций Грина в области обобщенных функций [28]. Пусть дано уравнение

$$Lu = f(x),$$

где L — дифференциальный оператор. Реакцией системы на импульсное воздействие в виде дельта-функции $\delta(x - \xi)$ будет функция Грина $G(x, \xi)$:

$$LG(x, \xi) = \delta(x - \xi).$$

Тогда решение $Lu = f$ получается типа свертки

$$u = \int_{\Omega} G(x, \xi) f(\xi) d\xi,$$

что легко проверяется:

$$Lu = \int_{\Omega} LG(x, \xi) f(\xi) d\xi = \int_{\Omega} \delta(x - \xi) f(\xi) d\xi = f(x).$$

Функционал χ^2 можно представить в виде

$$\chi^2 = \|AX - Y\|^2,$$

где X — вектор искомых коэффициентов, Y — вектор измеренных потоков и токов. Поскольку рассматриваемая задача некорректна по Адамару, решение слабо устойчиво по входным данным. Применим сингулярное разложение к матрице A :

$$A = U\Sigma V^T,$$

где U и V — ортогональные матрицы, Σ — диагональная матрица с сингулярными числами $\sigma_{ii} \geq 0$ и $\sigma_{ij} = 0$ при $i \neq j$. Вводя новые векторы $X' = V^T X$, $Y' = U^T Y$, приведем функционал к виду

$$\chi^2 = \|\Sigma X' - Y'\|^2.$$

Решение с минимальной нормой имеет вид $X'_i = Y'_i / \sigma_{ii}$ при $\sigma_{ii} > 0$, $X'_i = 0$ — при $\sigma_{ii} = 0$. Поскольку ортогональное преобразование не меняет нормы вектора $\|X\| = \|X'\|$, и при малых σ_{ii} норма решения может значительно меняться при изменении входных данных Y , в процессе минимизации функционала используется метод регуляризации *TSVD* (*Truncated Singular Value Decomposition*) [29]. При решении задачи минимизации отбрасывается вклад в решение, соответствующий малым σ_{ii} , что устраняет сильное изменение нормы $\|X\|$ и повышает устойчивость решения к погрешностям измерения.

Хотя рассматриваемый метод подразумевает множество итераций, при достаточно малом временном шаге равновесие плазмы в соседних временных точках не успевает значительно измениться. В этом случае, если использовать в качестве нулевого приближения равновесие, рассчитанное для предыдущего момента времени, то алгоритм сходится всего за одну итерацию.

3. Результаты численного восстановления равновесия плазмы по экспериментальным данным токамака Глобус-М

На рис. 4 показаны примеры равновесий плазмы в виде линий равного уровня полоидального потока системы вложенных магнитных поверхностей, полученных применением разработанного алгоритма к экспериментальным данным токамака Глобус-М. Полоидальная система катушек токамака Глобус-М способна создавать плазменный шнур различных равновесных конфигураций: с нижней X -точкой

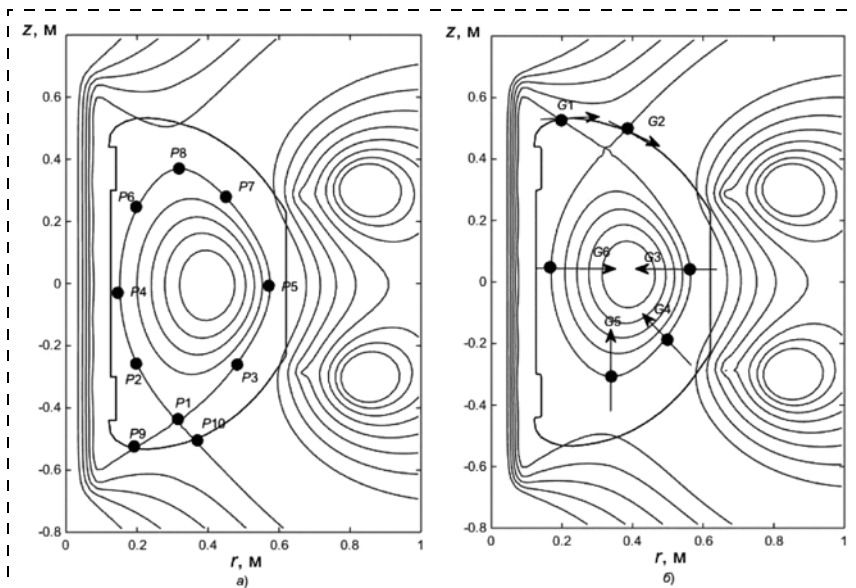


Рис. 4. Линии уровня восстановленного распределения полоидального потока в токамаке ГЛОБУС-М и точки измерения: а — полоидального потока на сепаратрисе; б — зазоров между первой стенкой и сепаратрисой

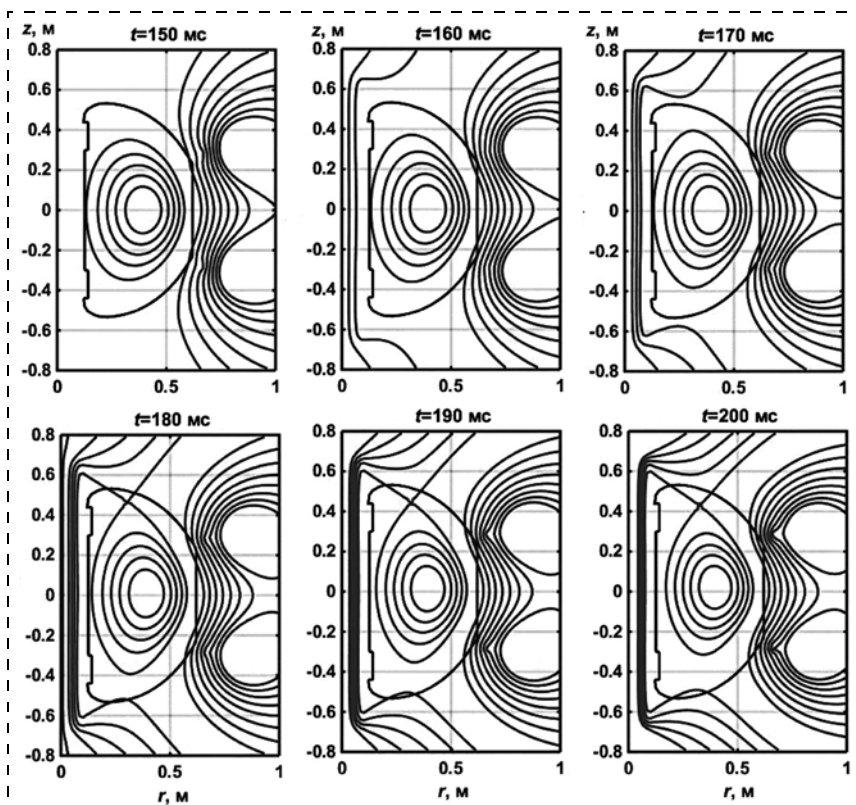


Рис. 5. Эволюция формы и положения плазмы, восстановленные для разряда № 31648 токамака Глобус-М

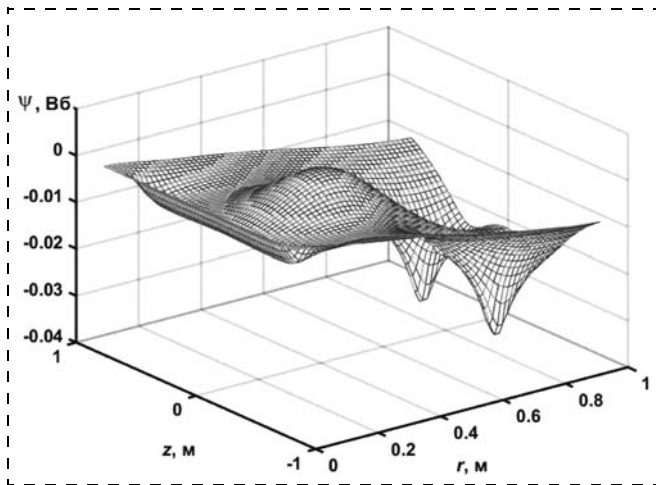


Рис. 6. Восстановленное распределение полоидального потока для момента времени $t = 180$ мс разряда № 31648 токамака Глобус-М

(рис. 4, а) и верхней X-точкой (рис. 4, б). На этих же рисунках приведены точки измерений как полоидальных потоков на сепаратрисе (рис. 4, а), так и зазоров между сепаратрисой и первой стенкой (рис. 4, б). Первый вид измерений необходим для применения управления положением сепаратрисы методом выравнивания потока на ней ("isoflux control") [9], а второй — для управления расстояниями (зазорами) от сепаратрисы до первой стенки [30] при применении алгоритма управления в контуре системы обратной связи.

На рис. 5 приведена эволюция формы и положения плазмы, восстановленных для разряда № 31648 токамака Глобус-М. Магнитные конфигурации получены через каждые 10 мс, начиная со 150 мс разряда. В моменты времени 150, 160, 170 мс в плазме существует лимитерная конфигурация, а в моменты времени 180, 190, 200 мс — диверторная конфигурация с одной верхней X-точкой. Таким образом, алгоритм восстановления равновесия плазмы

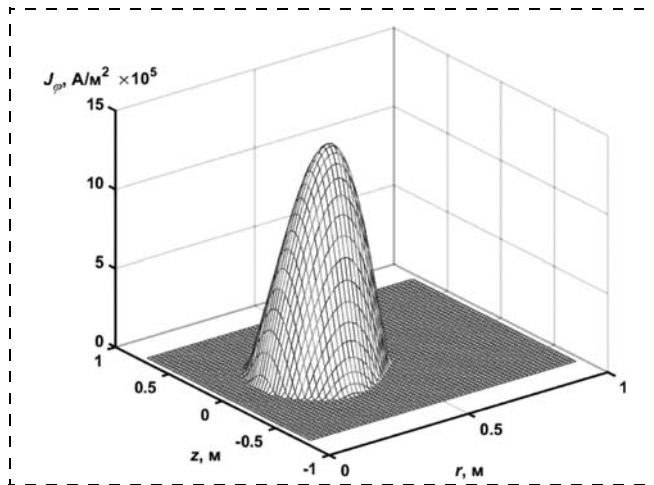


Рис. 7. Восстановленное распределение плотности тороидального тока плазмы для момента времени $t = 180$ мс разряда № 31648 токамака Глобус-М

позволяет проследить в течение всего разряда эволюцию магнитной конфигурации при восстановлении ее в дискретные моменты времени.

На рис. 6 и 7 показаны восстановленное распределение полоидального потока и соответствующее ему распределение плотности тока плазмы в трехмерном масштабе в координатах (ψ, r, z) и (J_ϕ, r, z) . При численном моделировании использовалась квадратная сетка размером 64×64 .

Алгоритм восстановления равновесия (программная реализация которого была названа *FCDI* — *Flux-Current Distribution Identification* [30]) был выверен на восстановительном коде *EFIT* [8] и эволюционном плазмозфизическом коде *DINA* (разработка ГНЦ РФ ТРИНИТИ) [31]. К экспериментальным данным разряда № 31648 токамака Глобус-М были применены коды *FCDI* и *EFIT*. Код *DINA* был настроен на режимы работы токамака Глобус-М, и на нем был промоделирован тот же разряд № 31648. Равновесие, восстановленное с

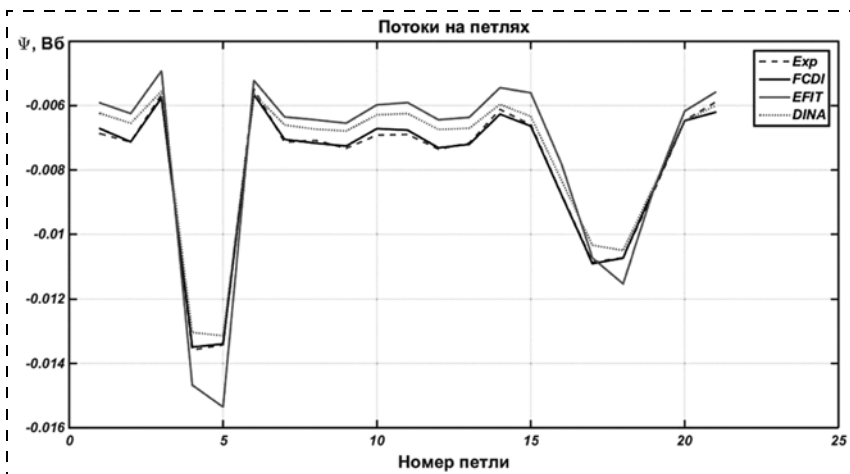


Рис. 8. Сравнение измеренных в эксперименте значений полоидального потока со значениями, рассчитанными (восстановленными) программами *FCDI*, *DINA* и *EFIT*

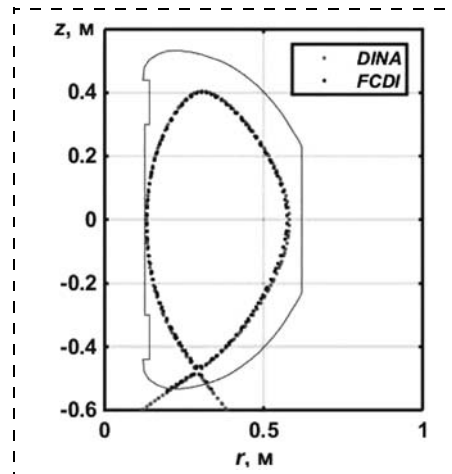


Рис. 9. Сравнение равновесия плазмы в токамаке, рассчитанного на коде *DINA*, и равновесия восстановленного алгоритмом *FCDI* по сигналам с кода *DINA*

помощью *FCDI* по экспериментальным сигналам магнитной диагностики, наиболее точно соответствует зарегистрированным в эксперименте значениям полоидального потока на магнитных петлях (рис. 8). Максимальная ошибка восстановления потока составляет 2 мВб для *FCDI*, 4 мВб — для *DINA* и 12 мВб — для *EFIT*.

Кроме того, положение сепаратрисы, восстановленное на коде *FCDI* по воспроизведенным на коде *DINA* сигналам с магнитных петель, совпадает с сепаратрисой, полученной на коде *DINA* с достаточно высокой точностью (рис. 9).

4. Построение линейных плазменных моделей относительно восстановленного равновесия плазмы

В отсутствие плазмы в токамаке динамика вектора токов I в катушках полоидального поля и элементах вакуумной камеры токамака (горизонтальных кольцах) описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением Кирхгофа, связывающим изменение вектора-столбца магнитного потока Ψ_c через контуры проводников с диагональной матрицей активных сопротивлений проводников R и вектором приложенных к ним напряжений U :

$$\frac{d}{dt} \Psi_c + RI = U.$$

При этом вектор потоков Ψ_c определяется произведением постоянной матрицы индуктивностей проводников

$$M_{cc} = \frac{d\Psi}{dI} = \text{const}$$

и вектора токов I , и поэтому дифференциальное уравнение Кирхгофа является линейным:

$$M_{cc} \dot{I} + RI = U.$$

При добавлении в систему подвижного контура плазмы с током I_p вектор магнитных потоков Ψ_c нелинейно зависит от положения магнитной оси

плазмы $\vec{r}_p = \begin{bmatrix} r_p \\ z_p \end{bmatrix}$ и формы плазмы, определяемых

распределениями полоидального потока ψ и плотности тока плазмы J_ϕ , реконструкции которых посвящены предыдущие разделы. От формы и положения плазмы также зависит магнитный поток

$$\Psi_p = M_{pp} I_p + M_{pc} I$$

через контур плазмы, определяемый собственной индуктивностью плазмы M_{pp} и током через плазму, а также матрицей взаимных индуктивностей между плазмой и катушками управления (катушками полоидального поля) $M_{pc} = M_{pc}^T$ и токами через эти катушки. Матрицы индуктивностей, связанных с плазмой, выражаются из восстановленных распределения плотности тока, формы и положения плаз-

мы с помощью функций Грина, например для M_{pc} следующим образом:

$$M_{pc}(\psi, J_\phi) = \frac{2\pi}{I_p} \int_{S(\psi)} G(\vec{r}_c, \vec{r}_p) J_\phi(\vec{r}_p) d\vec{r}_p.$$

Эти формулы определяют связь линейных моделей с восстановленными распределениями потока и тока плазмы и приводят к решению полной согласованной задачи идентификации плазмы.

Для получения линейной модели примем следующие физические допущения:

- масса и сопротивление плазмы пренебрежимо малы, поэтому они полагаются равными нулю;
- считается, что плазма не меняет свою форму при смещении по вертикали и горизонтали (концепция "жесткой модели" [32, 33]);
- изменение полного тока плазмы не сопровождается изменением профиля распределения плотности тока.

Запишем теперь линеаризованные уравнения Кирхгофа в отклонениях от равновесных распределений ψ и J_ϕ . Первое уравнение описывает контуры катушек и элементов камеры токамака, а второе — контур плазмы:

$$\begin{cases} M_{cc} \delta \dot{I} + M_{cp}(\psi, J_\phi) \delta \dot{I}_p + \\ + \frac{\partial}{\partial \vec{r}_p} \Psi_c(\psi, J_\phi) \delta \dot{\vec{r}}_p + R \delta I = \delta U; \\ M_{pc}(\psi, J_\phi) \delta \dot{I} + M_{pp}(\psi, J_\phi) \delta \dot{I}_p + \\ + \frac{\partial \Psi_p}{\partial \vec{r}_p}(\psi, J_\phi) \delta \dot{\vec{r}}_p = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку масса плазмы принимается равной нулю, действующая на плазму сила в полоидальной плоскости

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} - \nabla p$$

или в координатном виде

$$\begin{bmatrix} F_r \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_\phi B_z - \frac{\partial p}{\partial r} \\ -J_\phi B_r - \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix}$$

в любой момент должна быть равна нулю. Это равенство должно выполняться и при отклонениях от равновесных распределений ψ и J по положению магнитной оси плазмы и по токам в проводящих элементах:

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}_p} \vec{F}(\psi, J_\phi) \delta \vec{r}_p + \frac{\partial}{\partial I} \vec{F}(\psi, J_\phi) \delta I = 0. \quad (2)$$

Выразим из соотношения (3) отклонение $\delta \vec{r}_p$ через вектор изменения токов в катушках и элементах камеры δI , подставим $\delta \vec{r}_p$ в уравнение (2), выразим из второго уравнения полученной системы скорость изменения тока плазмы $\delta \dot{I}_p$ и подставим

ее в первое уравнение. В итоге уравнение линейной модели примет следующий вид:

$$\tilde{M}(\psi, J_{\phi})\delta \dot{I} + R\delta I = \delta U.$$

Матрица эффективных индуктивностей $\tilde{M}(\psi, J_{\phi})$ в этой формуле зависит от равновесия плазмы и находится по формуле

$$\begin{aligned} \tilde{M} = & M_{cc} - \frac{\partial \Psi_p}{\partial \vec{r}_p} \left(\frac{\partial \vec{F}_p}{\partial \vec{r}_p} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{F}}{\partial I} - \\ & - M_{cp} M_{pp}^{-1} \left(M_{pc} - \frac{\partial \Psi_p}{\partial \vec{r}_p} \left(\frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{r}_p} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{F}}{\partial I} \right). \end{aligned}$$

В конечном виде линейная модель плазмы в пространстве состояний запишется в виде

$$\begin{aligned} \delta \dot{I} &= A\delta I + B\delta U; \\ y &= C\delta I. \end{aligned} \tag{3}$$

Матрицы A и B выражаются через матрицы индуктивностей и сопротивлений по формулам

$$A = -\tilde{M}^{-1}R, \quad B = \tilde{M}^{-1}[E_{N \times N} \ 0_{N \times 1}]^T,$$

где E — единичная матрица; N — число обмоток токамака; V — число горизонтальных кольцевых элементов, на которые разбита вакуумная камера.

В качестве выходов модели y используются отклонения токов в восьми катушках управления от равновесных значений, горизонтальное и вертикальное смещения положения магнитной оси плазмы, изменение тока плазмы, приращения полоидального потока $\delta\psi_p$ в наборе из десяти точек $P1—P10$ на границе плазмы (см. рис. 4, а) и приращения δg шести зазоров между границей плазмы и вакуумной камерой (см. рис. 4, б). Выходы модели как отклонения от восстановленного равновесия токов в активных и пассивных структурах, положения магнитной оси плазмы, тока плазмы, потоков и расстояний сепаратрисы и первой стенки представляются в одном векторе

$$y = \begin{bmatrix} \delta I \\ \delta \vec{r}_p \\ \delta I_p \\ \delta \psi_p \\ \delta g \end{bmatrix}$$

и связаны с состояниями δI матрицей

$$\begin{aligned} C = & \begin{bmatrix} E_{N \times N} \ 0_{N \times N} \\ -\left(\frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{r}_p} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{F}}{\partial I} \\ -M_{pp}^{-1} \left(M_{pc} - \frac{\partial \Psi_p}{\partial \vec{r}_p} \left(\frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{r}_p} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{F}}{\partial I} \right) \\ \frac{1}{2\pi} \left(M_{pc} - \frac{\partial \Psi_{P1-P10}}{\partial \vec{r}_p} \left(\frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{r}_p} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{F}}{\partial I} - M_{pp} M_{pp}^{-1} \left(M_{pc} - \frac{\partial \Psi_p}{\partial \vec{r}_p} \left(\frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{r}_p} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{F}}{\partial I} \right) \right) \\ \frac{dg}{dI} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Здесь Ψ_{P1-P10} — вектор-столбец магнитного потока, создаваемого в горизонтальных контурах, проходящих через точки $P1—P10$ (см. рис. 4, а), M_{pc} — матрица взаимных индуктивностей между данными контурами, катушками полоидального поля и элементами камеры, а M_{pp} — вектор-столбец взаимных индуктивностей между рассматриваемыми контурами и плазмой.

5. Исследование линейных моделей плазмы для токамака Глобус-М

В этом параграфе исследуются неустойчивый полюс, частотные характеристики сингулярных чисел $\sigma_i(\omega)$ в зависимости от круговой частоты ω и ганкелевы сингулярные числа σ_i^H полученных линейных моделей (см. таблицу) для токамака Глобус-М для различных временных точек диверторной фазы разрядов. Это исследование полезно для обоснованного синтеза систем обратной связи в целях магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М [30].

Линейные модели имеют лишь один неустойчивый полюс, который характеризует неустойчивость плазмы по вертикали. Этот результат согласуется с предыдущим опытом построения линейных моделей плазмы в токамаках [15, 34]. График изменения неустойчивого полюса в течение разряда представлен на рис. 10.

В течение диверторной фазы разряда частотные характеристики модели меняются относительно слабо, что дает возможность построить работоспособный многомерный регулятор для замкнутой системы управления формой плазмы. В этом можно убедиться, построив частотные характеристики сингулярных чисел передаточной функции линейных моделей. Сингулярные числа $\sigma_i[G(s)]$ для матричной передаточной функции $G(s)$ можно вычислить, в частности, по формуле [35]

$$\sigma_i[G(s)] = +\sqrt{\lambda_i[G(s)G^*(s)]},$$

Линейные динамические модели плазмы в токамаке Глобус-М

Входы	Состояния	Выходы	
		"Isoflux"	Управление зазорами
Напряжения на восьми катушках полоидального поля: <i>HFC, VFC, CS, PF1, PF2top, PF2bottom, PF3, CC</i>	Токи в восьми катушках полоидального поля	Токи в восьми катушках полоидального поля	
		Вертикальное и радиальное смещение магнитной оси	
	Токи в 67 элементах вакуумной камеры	Ток плазмы	
		Потоки в десяти точках на сепаратрисе	Шесть зазоров между первой стенкой и сепаратрисой
Всего: 8	75	21	17

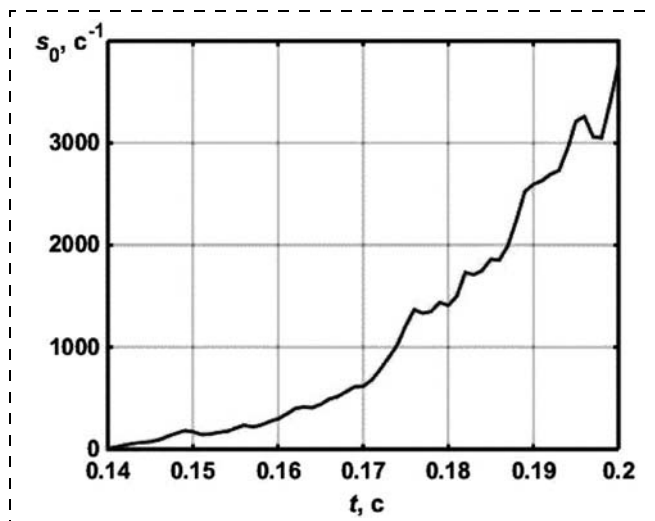


Рис. 10. Изменение неустойчивого полюса модели для разряда № 31648 токамака Глобус-М

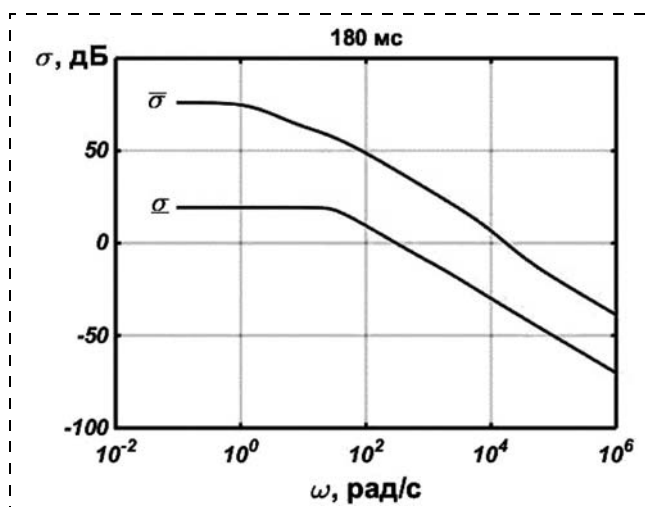


Рис. 11. Максимальные и минимальные сингулярные числа передаточных функций для полученных моделей для момента времени 180 мс разряда № 31648

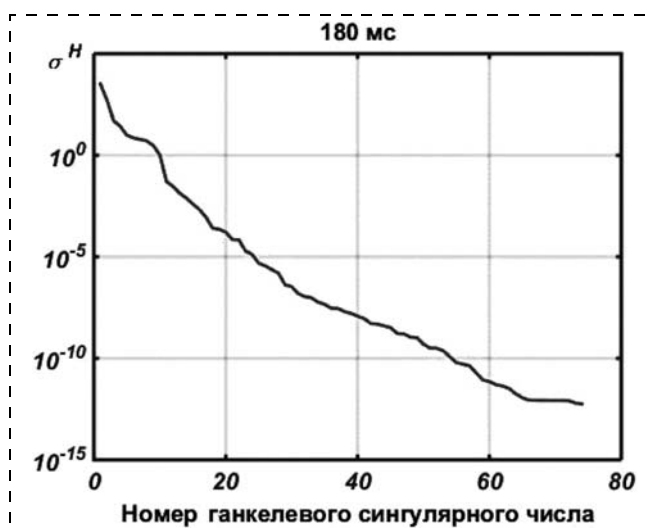


Рис. 12. Ганкелевы сингулярные числа для полученных моделей плазмы в момент времени 180 мс разряда № 31648 в логарифмическом масштабе

где $G^*(s) = G^T(\bar{s})$ — эрмитово сопряжение матрицы; λ_i — собственные значения матрицы. Наибольший интерес представляют максимальные и минимальные сингулярные числа передаточной функции линейной модели плазмы, частотные зависимости которых в качестве примера приведены на рис. 11 для момента времени $t_0 = 180$ мс. Эти числа являются коэффициентами усиления матричной передаточной функции в наиболее слабом и наиболее сильном направлениях [35].

Максимальное относительное изменение сингулярных чисел в течение диверторной фазы разряда, найденные по формуле

$$\delta\sigma = \max_{t, \omega} \left| \frac{\sigma(t, \omega) - \sigma(t_0, \omega)}{\sigma(t_0, \omega)} \right| \cdot 100 \%,$$

равняются 12,2 % для максимального сингулярного числа и 2,3 % — для минимального. В этой формуле $t = \{185, 190, 195\}$ мс является дискретным временем разряда, для которого восстанавливалось равновесие плазмы и создавались линейные модели.

Для оценки внутренней связи состояний модели в пространстве состояний со входом и выходом применяются ганкелевы сингулярные числа [35, 36]. Они вычисляются для сбалансированной реализации устойчивой передаточной функции, у которой граничные управляемости C_G и наблюдаемости O_G являются диагональными матрицами и равны между собой:

$$C_G = O_G = \Sigma,$$

где $C_G = \int_0^\infty e^{At} B B^T e^{A^T t} dt$, $O_G = \int_0^\infty e^{A^T t} C^T C e^{At} dt$, а матрицы A , B и C — это матрицы в базе сбалансированной реализации. Числа, расположенные в убывающем порядке $\sigma_1^H \geq \sigma_2^H \geq \dots \geq \sigma_n^H$ на диагонали матрицы $\Sigma = \text{diag}[\sigma_1^H, \dots, \sigma_n^H]$, называются ганкелевыми сингулярными числами (*Hankel singular values*). Эти числа также можно определить более общим способом:

$$\sigma_i^H = +\sqrt{\lambda_i(C_G O_G)}, i = 1, \dots, n.$$

Ганкелевы сингулярные числа сбалансированной реализации устойчивой части системы для момента времени 180 мс диверторной фазы разряда показаны на рис. 12. Максимальное относительное изменение ганкелевых сингулярных чисел в течение разряда равно

$$\delta\sigma^H = \max_{t, i} \left| \frac{\sigma_i^H(t) - \sigma_i^H(t_0)}{\sigma_i^H(t_0)} \right| \cdot 100 \% = 57 \%.$$

Здесь $t = \{185, 190, 195\}$ мс, $i = 1, 2, \dots, 74$ — номер ганкелевого сингулярного числа. Из рис. 12 видна большая разница между максимальным и



Рис. 13. Блок-схема программы *FCDI*

минимальным ганкелевыми сингулярными числами (около 16 порядков). Это говорит о том, что линейные модели можно редуцировать и значительно уменьшить их высокий порядок, равный 75.

6. Программная реализация алгоритма

Разработанный алгоритм реализован в виде программного кода *FCDI* — *Flux-Current Distribution Identification* [30], написанного в программно-вычислительной среде *MATLAB* и конвертированного в среду *LabVIEW* — *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench* [37]. *LabVIEW* — это среда графического программирования, использующая язык "G" программирования потоков данных. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 13. Программа состоит из выполняющихся последовательно блоков, называемых *виртуальными приборами*. Вначале данные магнитной диагностики токамака (см. рис. 1, б) подаются на блок восстановления равновесия, который находит итерационным методом распределение тороидального тока плазмы и полоидального потока в вакуумной камере токамака. Затем полученные данные распределений подаются на блок построения линейных моделей, выдающий матрицы A, B, C модели (4) в пространстве состояний [30].

Блок восстановления равновесия состоит из нескольких виртуальных приборов. Первый виртуальный прибор находит границу плазмы (сепаратрису) по распределению потока, полученного на предыдущей итерации, второй строит базисные распределения плотности тока внутри найденной границы плазмы, третий находит коэффициенты перед базисными распределениями через минимизацию функционала. В качестве базисных функций используются полиномы от полоидального потока.

Алгоритм идентификации в *LabVIEW* может быть непосредственно инсталлирован в операционную систему процессора или ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) реального времени компании *National Instruments (ni.com)* для обеспечения высокой производительности и быстродействия при работе с реальным объектом управления — плазмой в токамаке.

7. Стенд реального времени для системы магнитного управления плазмой в токамаке

Полученные прикладные результаты по разработке алгоритма восстановления равновесия плазмы и генерация относительно него линейных моделей плазмы в токамаке направлены на создание системы управления током и формой плазмы в реальном времени. По линейным моделям синтезируются регуляторы обратной связи для управления положением, током и формой плазмы.

Алгоритм восстановления и модели созданы на основе экспериментальных данных действующего сферического токамака Глобус-М, и поэтому система управления формой плазмы будет разрабатываться в первую очередь для этой установки. Система может быть создана на основе стенда реального времени, показанного схематично на рис. 14

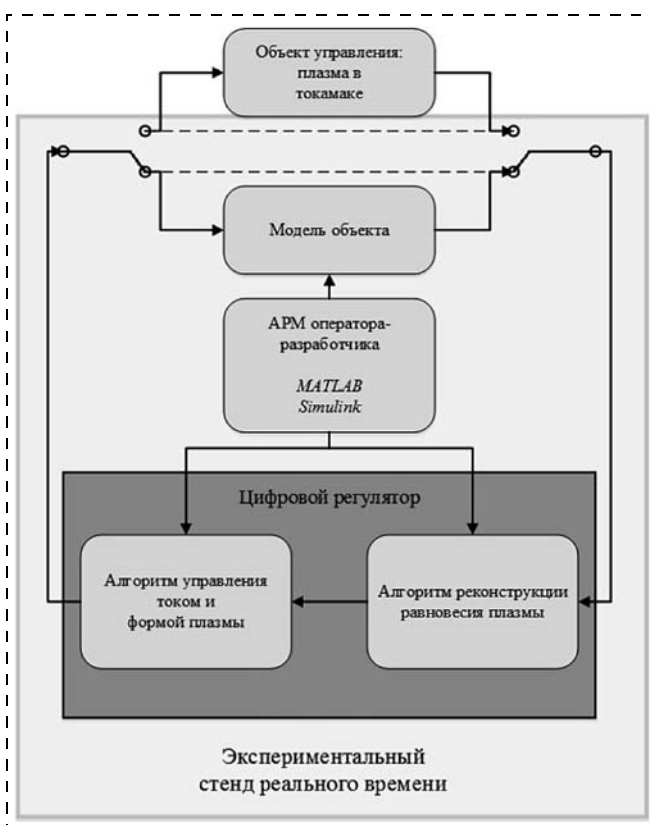


Рис. 14. Структурная схема стенда реального времени

и позволяющего наиболее удобным и надежным способом внедрить сложную многомерную систему управления током и формой плазмы в физический эксперимент [21]. Основная идея стенда состоит в том, что система управления плазмой отлаживается на модели плазмы в реальном времени, а затем регулятор переключается на реальный объект посредством программного переключателя.

Стенд реального времени должен состоять из трех вычислительных средств (см. рис. 14):

- модели объекта управления (плазмы в токамаке) совместно с исполнительными устройствами и диагностикой;
- регулятора в обратной связи, реализующего разрабатываемые алгоритмы управления и диагностики плазмы в токамаке. Если регулятор является цифровым, то на входе регулятора устанавливается аналого-цифровой преобразователь, а на выходе — цифроаналоговый преобразователь;
- автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора-разработчика (*host computer*) — компьютера со средой и инструментами подготовки системы управления к эксперименту, сбора и обработки данных, настройки используемых алгоритмов управления и идентификации. АРМ оператора-разработчика должен обеспечивать настройку алгоритмов и моделей в соответствующих форматах для модели объекта управления и регулятора.

Данный подход, когда вместо объекта в системе управления реального времени используется модель, в зарубежной литературе называется *Hardware-In-the-Loop (HIL) Simulation*. Аналогичный подход, в частности, используется на токамаке *DIII-D* (США) в течение долгого времени, что показало его удобство и эффективность в настройке и работе с системой управления плазмой [38].

Заключение

В статье представлен разработанный алгоритм решения задачи идентификации положения магнитной оси плазмы, формы и распределения плотности тока и потока плазмы в токамаке по значениям токов в катушках полоидального поля токамака, полного тока плазмы и полоидального магнитного потока вне плазмы. Рассматриваемая задача сводится к нахождению распределения полоидального потока как решения уравнения Града — Шафранова в частных производных второго порядка с неизвестной правой частью и является некорректной по Адамару. Для ее решения используется аппроксимация правой части уравнения (плотности тороидального тока плазмы) базисными функциями от полоидального потока. Коэффициенты перед базисными функциями находятся итерационно через минимизацию суммы квадратов разностей между сигналами диагностики токамака и рассчитанными значениями токов и потоков. При достаточно малом временном шаге решение

может быть получено за одну итерацию. Алгоритм реализован в программно-вычислительной среде *MATLAB* и графической среде виртуальных приборов *LabVIEW*.

После реконструкции равновесия плазмы находится линейная динамическая модель в пространстве состояний, описывающая, как форма, положение и ток плазмы меняются при изменении напряжений на катушках полоидального поля токамака. Для этого плазма и обмотки токамака рассматриваются как система контуров тока со взаимными индуктивностями, нелинейно зависящими от восстановленного распределения тороидального тока и полоидального потока.

Таким образом, решена полная задача идентификации плазмы в токамаке для ее магнитного управления: восстановлено равновесие по магнитным измерениям вне плазмы как объекта с распределенными параметрами, по которому построена линейная динамическая модель плазмы с учетом полоидальной системы токамака. Задача идентификации решена применением законов физики и пониманием физики плазмы в аксиально симметричной тороидальной магнитной конфигурации токамака, что принципиально отличает примененные подходы от известных методов идентификации в теории управления.

По линейным моделям плазмы синтезируются алгоритмы управления положением, током и формой плазмы, которые могут быть встроены в стенд реального времени совместно с алгоритмом восстановления равновесия плазмы для применения в физическом эксперименте.

Авторы выражают благодарность сотруднику ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН д-ру физ.-мат. наук В. К. Гусеву за предоставленные экспериментальные данные с токамака Глобус-М, а также д-ру Л. Лао из компании General Atomics (США) за возможность использовать в работе восстановительный код EFIT по накопленным данным. Авторы благодарят канд. физ.-мат. наук В. Н. Докуку и д-ра физ.-мат. наук Р. Р. Хайрудинову за предоставленные данные с кода DINA для сравнения с кодом FCDI при работе с экспериментальными данными токамака Глобус-М.

Список литературы

1. Artsimovich L. Tokamak devices // Nuclear Fusion. 1972. Vol. 12, N. 2. P. 215—252.
2. Кадомцев Б. Б., Шафраник В. Д. Магнитное удержание плазмы // Успехи физических наук. 1983. Т. 139, Вып. 3. С. 399—434.
3. Wesson J. Tokamaks. Oxford: Clarendon Press, 1997.
4. Арсенин В. В., Чуянов В. А. Подавление неустойчивостей плазмы методом обратной связи // Успехи физических наук. 1977. Т. 123, Вып. 1. С. 83—129.
5. Gusev V., Azizov E., Alekseev A. et al. Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2 // Nuclear Fusion. 2013. Vol. 53. N. 9. 0914013. P. 14.
6. Azizov E., Khvostenko P., Belyakov V., Bondarchuk E., Filatov O., Krylov V., Melnikov A., Mineev A., Sokolov M., Sushkov A. Status of upgrading project of tokamak T-15 // 25th Fusion Energy Conference (FEC 2014), Saint Petersburg, Russia, 13—18 October

2014. URL: <http://www-pub.iaea.org/iaecameetings/46091/25th-Fusion-Energy-Conference-FEC-2014>).

7. **Beghi A., Cenedese A.** Advances in real-time plasma boundary reconstruction: from the gap description to a deformable model approach // IEEE Control Systems Magazine. 2005. Vol. 25, N. 5. P. 44–64.

8. **Lao L., John H., Stambaugh R., Kellman A., Preiffer W.** Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in tokamaks // Nuclear Fusion. 1985. Vol. 25, N. 11. P. 1611–1622.

9. **Hofmann F., Tonetti G.** Fast identification of plasma boundary and X-points in elongated tokamaks // Nuclear Fusion. 1988. Vol. 28, N. 3. P. 519–522.

10. **Walker M. L., Humphreys D. A., Leuer J. A., Ferron J. R., Penafior B. G.** Implementation of model-based multivariable control on DIII-D, GA-A23468, 2000.

11. **O'Brian D., Ellis J., Lingertat J.** Local expansion method for fast plasma boundary identification in JET // Nuclear Fusion. 1993. Vol. 33, N. 3. P. 467–474.

12. **Sartori F., Tommasi G. D., Piccolo F.** The Joint European Torus // IEEE Control Systems Magazine. 2006. Vol. 26. No. 2. pp. 64–78.

13. **Кузнецов Е. А., Митришкин Ю. В.** Автоколебательная система стабилизации неустойчивого вертикального положения плазмы сферического токамака ГЛОБУС-М. М.: Изд. Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2005. 71 с.

14. **Шафранов В. Д.** Равновесие плазмы в магнитном поле // Вопросы теории плазмы. 1963. Вып. 2. С. 92–131.

15. **Ariola M., Pironti A.** Magnetic control of tokamak plasmas. Springer-Verlag, 2008.

16. **Ljung L.** System Identification. Theory for the User, 2nd ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1999.

17. **Verhaegen M., Verdult V.** Filtering and System Identification. A Least Squares Approach. Cambridge University Press, 2007.

18. **Сакрутина Е. А., Бахтадзе Н. Н.** Идентификация систем на основе вейвлет-анализа // XII Всероссийское совещание по проблемам управления, ВСПУ-2014, Москва 16–19 июня, 2014.

19. **Фрейзер М.** Введение в вейвлеты в свете линейной алгебры. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2008. 487 с.

20. **Rózewski P., Novikov D., Bakhtadze D., Zaikin O.** New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

21. **Mitishkin Y. V., Efremov A. A., Zenkov S. M.** Experimental Test Bed for Real Time Simulations of Tokamak Plasma Control Systems // Journal of Control Engineering and Technology. 2013. Vol. 3, Iss. 3. P. 121–130. URL: <http://www.ijcet.org/>

22. **Зайцев Ф. С.** Математическое моделирование эволюции тороидальной плазмы. 2-е изд. М.: МАКС Пресс, 2011, 640 с.

23. **Матвеев А. Н.** Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.

24. **Джанколи Д.** Физика. Т. 2. М.: Мир, 1989. 668 с.

25. **Тихонов А. М., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. 2-е издание. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.

26. **Самарский А. А., Вабишев П. Н.** Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: ЛКИ, 2015. 480 с.

27. **Абрамовиц М., Стиган И.** Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

28. **Босс В.** Лекции по математике. Т. 11: Уравнения математической физики. М.: Книжный дом "ЛИБРИКОМ", 2009. 224 с.

29. **Forsythe G., Malcolm M., Moler C.** Computer methods for mathematical computations. NJ: Englewood Cliffs, 1977.

30. **Mitishkin Y. V., Korenev P. S., Kartsev N. M., Patrov M. I.** Plasma shape control with a linear model for Globus-M tokamak // 41st Conference on Plasma Physics, Berlin, Germany, June 23–27, 2014. P.4.054.

31. **Лукаш В. Э., Докука В. Н., Хайрутдинов Р. Р.** Программно-вычислительный комплекс ДИНА в системе MATLAB для решения задач управления плазмой токамака // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2004. Вып. 1. С. 40–49.

32. **Walker M., Humphreys D.** A multivariable analysis of the plasma vertical instability in tokamaks // Proc. 45th IEEE Conf. on Decision and Control. San Diego. 2006. P. 2213–2219.

33. **Walker M., Humphreys D.** Valid coordinate systems for linearized plasma shape response models in tokamaks // Fusion Science and Technology. 2006. Vol. 50. N. 4. P. 473–489.

34. **Митришкин Ю. В.** Управление плазмой в экспериментальных термоядерных установках: Адаптивные автоколебательные и робастные системы управления. М.: КРАСАНД, 2016. 400 с.

35. **Skogestad S., Postlethwaite I.** Multivariable Feedback Control (2nd ed.), Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2005.

36. **Glad T., Ljung L.** Control Theory. Multivariable and Nonlinear Methods. Taylor & Francis, London, 2000. 467 p.

37. **Трэвис Дж., Кринг Дж.** Lab VIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2011.

38. **Walker M. L., Humphreys D. A., Leuer J. A., Ferron J. R., Penafior B. G.** Implementation of model-based multivariable control on DIII-D, GA-A23468, 2000.

Reconstruction of Equilibrium Distribution of Tokamak Plasma Parameters by External Magnetic Measurements and Construction of Linear Plasma Models

P. S. Korenev, pkorenev92@mail.ru, **Y. V. Mitishkin**, vvm@mail.ru✉,
Moscow State University, Faculty of Physics, 119991, Moscow, Russian Federation,
Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation,
M. I. Patrov, michael.patrov@mail.ioffe.ru, Ioffe Physical Technical Institute
of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russian Federation

Corresponding author: **Mitishkin Yuri V.**, D. Sc., Professor,
Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991, Russian Federation, yvm@mail.ru

Received on October 15, 2015
Accepted on November 16, 2015

The article is devoted to solving of the problem of identification of a complex dynamic plant with the distributed parameters — plasma in a tokamak magnetic field. This identification problem is solved not with the use of the advanced techniques of identification, such as subspace method or wavelets, but with application of the laws of physics and knowledge of the plasma as a controlled plant. Models of plasma are constructed from the magnetic measurements of the plasma by solving of the ill-posed problem in Hadamard's sense boundary value using the least squares method. Essentially, this is the problem of the plasma equilibrium distribution of the poloidal flux, toroidal current and of the plasma boundary reconstruction. Reconstruction (or static identification) is implemented on-line by means of the signals from the magnetic loops outside the plasma, as well as the signals from the Rogowski coils, which measure the plasma current and the currents creating the poloidal magnetic field. The plasma equilibrium is described by Grad-Shafranov equation with the unknown right-hand side (plasma current density).

We approximate the plasma current density with the linear functions of the poloidal flux and iteratively solve the equation using Green's function method. Reconstructed equilibrium is used for computation of the effective inductance matrices of the system, which are applied for construction of the linear dynamic models of the tokamak plasma. The dynamic model equation is derived from the plasma force balance equation and the linearized Kirchhoff equations for plasma and tokamak coils. The constructed linear models may be used for synthesis of tokamak plasma position, current and shape control systems. The algorithms of plasma reconstruction and construction of the linear models were applied to the experimental data from spherical tokamak Globus-M (Ioffe Physical-Technical Institute of MS, St. Petersburg) in MATLAB and LabVIEW computing environments.

Keywords: identification, tokamak, plasma equilibrium reconstruction, distributed parameters, plasma shape, poloidal flux, toroidal current, linear dynamic models

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 14-08-00380A.

For citation:

Korenev P. S., Mitrishkin Y. V., Patrov M. I. Reconstruction of Equilibrium Distribution of Tokamak Plasma Parameters by External Magnetic Measurements and Construction of Linear Plasma Models, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 254–266.

DOI: 10.17587/mau/17.254-266

References

1. Artsimovich L. Tokamak devices, *Nuclear Fusion*, 1972, vol. 12, no. 2, pp. 215–252.
2. Kadomcev B. B., Shafranov V. D. *Magnitnoye uderzhanie plazmi* (Plasma magnetic confinement), *Uspehi Fizicheskikh Nauk*, 1983, vol. 139, no. 3, pp. 399–434 (in Russian).
3. Wesson J. Tokamaks, Oxford, Clarendon Press, 1997.
4. Arsenin V. V., Chuyanov V. A. *Podavlenie neustoychivostey plazmi metodom obratnoy svyazi* (Suppressing plasma instabilities via feedback method), *Uspehi Fizicheskikh Nauk*, 1977, vol. 123, no. 1, pp. 83–129 (in Russian).
5. Gusev V., Azizov E., Alekseev A. et al. Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2, *Nuclear Fusion*, 2013, vol. 53, no. 9, 0914013, pp. 14.
6. Azizov E., Khvostenko P., Belyakov V., Bondarchuk E., Filatov O., Krylov V., Melnikov A., Mineev A., Sokolov M., Sushkov A. Status of upgrading project of tokamak T-15, *25th Fusion Energy Conference (FEC 2014)*, Saint Petersburg, Russia, 13–18 October 2014, available at <http://www-pub.iaea.org/iaecameetings/46091/25th-Fusion-Energy-Conference-FEC-2014>.
7. Beghi A., Cenedese A. Advances in real-time plasma boundary reconstruction: from the gap description to a deformable model approach, *IEEE Control Systems Magazine*, 2005, vol. 25, no. 5, pp. 44–64.
8. Lao L., John H., Stambaugh R., Kellman A., Preiffer W. Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in tokamaks, *Nuclear Fusion*, 1985, vol. 25, no. 11, pp. 1611–1622.
9. Hofmann F., Tonetti G. Fast identification of plasma boundary and X-points in elongated tokamaks, *Nuclear Fusion*, 1988, vol. 28, no. 3, pp. 519–522.
10. Walker M. L., Humphreys D. A., Leuer J. A., Ferron J. R., Penafior B. G. Implementation of model-based multivariable control on DIII-D, *GA-A23468*, 2000.
11. O'Brien D., Ellis J., Lingertat J. Local expansion method for fast plasma boundary identification in JET, *Nuclear Fusion*, 1993, vol. 33, no. 3, pp. 467–474.
12. Sartori F., Tommasi G. D., Piccolo F. The Joint European Torus, *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, vol. 26, no. 2, pp. 64–78.
13. Kuznetsov E. A., Mitrishkin Y. V. *Avtokolebatelnaya Sistema stabilizatsii neustoychivogo vertikalnogo polozheniya plazmi sfericheskogo tokamaka GLOBUS-M* (Self-oscillating stabilization system for unstable vertical position of plasma in spherical tokamak GLOBUS-M), Publishing house of Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2005, pp. 71 (in Russian).
14. Shafranov V. D. *Ravnovesie plazmi v magnitnom pole* (Plasma equilibrium in a magnetic field), *Voprosi Teorii Plazmi*, 1963, Vol. 2, pp. 92–131 (in Russian).
15. Ariola M., Pironti A. Magnetic control of tokamak plasmas, Springer-Verlag, 2008.
16. Ljung L. *System Identification. Theory for the User*, 2nd ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1999.
17. Verhaegen M., Verduft V. *Filtering and System Identification. A Least Squares Approach*, Cambridge University Press, 2007.
18. Sakrutina E. A., Bahtadze N. N. *Identifikatsiya system na osnove veyvlet-analiza* (System identification on base of wavelet analysis). *XII Vserossiyskoe Soveschanie po Problemam Upravleniya, VSPU-2014*, Moscow, June 16–19, 2014 (in Russian).
19. Frazier M. *Vvedenie v veivleti v svete lineynoy algebr* (An introduction to wavelets through linear algebra), Moscow, Binom, Laboratoriya znaniy, 2008, pp. 487 (in Russian).
20. Rózewski P., Novikov D., Bakhtadze D., Zaikin O. *New Frontiers in Information and Production Systems Modelling and Analysis*, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
21. Mitrishkin Y. V., Efremov A. A., Zenkov S. M. Experimental Test Bed for Real Time Simulations of Tokamak Plasma Control Systems, *Journal of Control Engineering and Technology*, July 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 121–130, available at <http://www.ijcet.org/>.
22. Zaycev F. C. *Matematicheskoye modelirovanie evolucii toroidalnoy plazmi* (Mathematical modelling of toroidal plasma evolution), 2nd ed., Moscow, MAKS Press, 2011, pp. 640 (in Russian).
23. Matveev A. N. *Electrichestvo i magnetizm* (Electricity and magnetism). Moscow, Vishaya shkola, 1983, pp. 463 (in Russian).
24. Giancoli D. *Fizika* (General physics). Vol. 2, Moscow, Mir, 1989, pp. 668 (in Russian).
25. Tikhonov A. M., Arsenin V. Y. *Metodi resheniya nekorrektnih zadach* (Methods for solving ill-posed problems), 2nd ed., Moscow, Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literaturi, 1979 (in Russian).
26. Samarskiy A. A., Vabischev P. N. *Chislennye metody resheniya obratnih zadach matematicheskoy fiziki* (Numerical method for solving inverse problems of mathematical physics), Moscow, LKI, 2015, pp. 480 (in Russian).
27. Abramovits M., Stigan I. *Spravochnik po specialnim funktsiyam* (Handbook of special functions), Moscow, Nauka, 1979, pp. 832 (in Russian).
28. Boss V. *Lekcii po matematike* (Lecture on mathematics). Vol. 11: *Upravneniya matematicheskoy fiziki* (Mathematical physics equation), Moscow, Knizhnyi dom "LIBRIKOM", 2009, pp. 224 (in Russian).
29. Forsythe G., Malcolm M., Moler C. *Computer methods for mathematical computations*, NJ, Englewood Cliffs, 1977.
30. Mitrishkin Y. V., Korenev P. S., Kartsev N. M., Patrov M. I. Plasma shape control with a linear model for Globus-M tokamak. *41st Conference on Plasma Physics*, Berlin, Germany, June 23–27, 2014, P4.054.
31. Lukash V. E., Dokuka V. N., Khayrutdinov R. R. *Programma-no-vichislitelnyy kompleks DINA v sisteme MATLAB dlya resheniya zadach upravleniya plazmoy tokamaka* (Computational software complex DINA in MATLAB environment for solving tokamak plasma control problems), *Voprosi Atomnoy Nauki i Tehniki: Termoyaderniy Sintez*, 2004, vol. 1, pp. 40–49 (in Russian).
32. Walker M., Humphreys D. A multivariable analysis of the plasma vertical instability in tokamaks, *Proc. 45th IEEE Conf. on Decision and Control*, San Diego, 2006, pp. 2213–2219.
33. Walker M., Humphreys D. Valid coordinate systems for linearized plasma shape response models in tokamaks, *Fusion Science and Technology*, 2006, vol. 50, no. 4, pp. 473–489.
34. Mitrishkin Y. V. *Upravlenie plazmoy v eksperimentalnykh termoyadernykh ustanovkakh: Adaptivnye avtokolebatelnye i robastnye sistemi upravleniya* (Plasma control in experimental thermonuclear plants: Adaptive Self-oscillating and robust control systems), Moscow, KRASAND, 2016, pp. 400 (in Russian).
35. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control* (2nd ed.), Chichester, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
36. Glad T., Ljung L. *Control Theory. Multivariable and Nonlinear Methods*, Taylor & Francis, London, 2000, pp. 467.
37. Travis J., Kring J. *LabVIEW dlya vseh* (LabVIEW for everyone). 4th ed., Moscow, DMK Press, 2011 (in Russian).
38. Walker M. L., Humphreys D. A., Leuer J. A., Ferron J. R., Penafior B. G. Implementation of model-based multivariable control on DIII-D, *GA-A23468*, 2000.

А. А. Косов, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., aakosov@yandex.ru,

С. А. Ульянов, канд. техн. наук, науч. сотр., sau@icc.ru,

Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

Об определении ориентации и стабилизации космического аппарата с помощью наблюдателя состояния¹

Рассматривается задача определения углового положения космического аппарата в режиме точной ориентации в орбитальной системе координат по данным гироскопического измерителя вектора угловой скорости и датчика местной вертикали. Предложен подход к решению этой задачи с помощью наблюдателя состояния, построенного по кинематическим уравнениям. Численным моделированием подтверждена работоспособность предложенного наблюдателя при использовании его выходных переменных в системе стабилизации в орбитальной системе координат. Рассмотрена также двойственная задача определения компонент вектора угловой скорости по измерениям углов ориентации с помощью высокоточных звездных датчиков.

Ключевые слова: космический аппарат, ориентация, неполное измерение, наблюдатель состояния, управление, стабилизация

Введение

Для космических аппаратов (КА) с длительными сроками функционирования, таких как спутники связи, актуальной задачей является разработка резервных способов поддержания точной трехосной ориентации в ситуациях, когда нет возможности использовать в канале управления данные измерений полного вектора состояния [1]. В таких случаях обычно применяются наблюдатели состояния для асимптотического оценивания (восстановления) недоступных измерению компонент вектора состояния и последующего использования полученной оценки в канале обратной связи [2]. Другой подход может основываться на привлечении дополнительной информации о текущей ориентации КА, получаемой с использованием радиосигналов [1, 3].

В данной статье рассматривается задача асимптотического оценивания трех недоступных прямого измерению углов ориентации КА в режиме точной ориентации в орбитальной системе координат с помощью наблюдателя состояния. В уравнениях наблюдателя используются данные с гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС) и данные с датчика местной вертикали. Заметим, что для современных версий этих приборов характерны следующие точностные характеристики (по данным, соответственно, из работ [4] и [5]): для ГИВУС — порядка 0,001 °/ч и для построителя местной вертикали — порядка 3'. В статье предложены коэффициенты обратной связи для уравнений наблюдателя, обеспечивающие затухание ошибки.

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 13-08-00948 и № 15-08-06680).

Работоспособность предложенного наблюдателя проверена численным моделированием замкнутой системы стабилизации для спутника с упругими элементами.

Рассмотрена также в некотором смысле двойственная задача определения компонент вектора угловой скорости для случая отказа ГИВУС по измерениям углов ориентации с помощью высокоточных звездных датчиков. Здесь в отличие от работы [2], где предлагается на каждом шаге дискретизации строить по громоздким формулам наблюдатель состояния, можно обойтись вычислением производных от измеряемых углов, используя аппроксимацию.

1. Определение углов ориентации с помощью построения наблюдателя состояния с использованием гироскопического измерителя вектора угловой скорости и построителя местной вертикали

1.1. Постановка задачи

Кинематические уравнения углового движения КА вокруг центра масс возьмем в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \frac{\omega_1 \cos\theta - \omega_2 \sin\theta + \Omega \cos\varphi \sin\varphi}{\cos\varphi}; \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \omega_1 \sin\theta + \omega_2 \cos\theta - \Omega \sin\psi; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_3 + (\omega_2 \sin\theta - \omega_1 \cos\theta) \operatorname{tg}\varphi - \\ &\quad - \Omega \cos\psi \left(\cos\varphi + \frac{\sin^2\varphi}{\cos\varphi} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\psi(t)$, $\varphi(t)$ и $\theta(t)$ — значения углов ориентации по рысканью, крену и тангажу в момент времени t , они показывают положение связанной системы координат относительно орбитальной; $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ и $\omega_3(t)$ — проекции вектора угловой скорости на оси связанной системы координат; Ω — орбитальная угловая скорость. Предполагается, что спутник движется по круговой орбите с известным периодом обращения порядка 90 мин, чему соответствуют значения орбитальной угловой скорости порядка $\Omega = 0,001$. Режиму точной ориентации соответствуют значения $\psi(t) \equiv 0$, $\varphi(t) \equiv 0$, $\theta(t) \equiv 0$, $\omega_1(t) \equiv 0$, $\omega_2(t) \equiv 0$ и $\omega_3(t) \equiv \Omega$. Считается, что реальное движение происходит в окрестности режима точной ориентации с малыми отклонениями.

Компоненты вектора угловой скорости $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ и $\omega_3(t)$ полагаются доступными непосредственному измерению с помощью гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС). Результат измерения, выдаваемый ГИВУС, будем обозначать $\bar{\omega}_1(t)$, $\bar{\omega}_2(t)$ и $\bar{\omega}_3(t)$. Пусть в составе бортовой измерительной аппаратуры имеется также построитель местной вертикали, с помощью которого можно измерять $\bar{y}_1(t)$, $\bar{y}_2(t)$ и $\bar{y}_3(t)$ проекции вектора направления на центр Земли (т.е. вектора центр масс спутника — центр Земли) на оси связанной системы координат. В орбитальной системе координат вектор направления на центр Земли известен и является в случае круговой орбиты постоянным: $Y_1(t) \equiv 0$, $Y_2(t) \equiv 0$ и $Y_3(t) \equiv -1$. Обозначим этот вектор $Y = \text{col}(0 \ 0 \ -1)$. Наша задача состоит в том, чтобы по поступающим с ГИВУС измерениям $\bar{\omega}_1(t)$, $\bar{\omega}_2(t)$ и $\bar{\omega}_3(t)$ и поступающим от построителя местной вертикали измерениям $\bar{y}_1(t)$, $\bar{y}_2(t)$ и $\bar{y}_3(t)$ восстановить значения текущих углов ориентации $\psi(t)$, $\varphi(t)$ и $\theta(t)$.

1.2. Решение задачи с помощью наблюдателя состояния

Для решения поставленной задачи будем строить наблюдатель состояния по кинематическим уравнениям (1), которые выполняются точно. Любой вектор, имеющий в орбитальной системе координат заданные компоненты $Z = \text{col}(z_1 \ z_2 \ z_3)$, в связанной системе координат будет иметь компоненты $M(\psi, \varphi, \theta)Z$, где $M(\psi, \varphi, \theta)$ есть (3×3) -матрица перехода. Поскольку переход от орбитальной системы координат к связанной осуществляется тремя последовательными поворотами соответственно на углы тангажа, рысканья и крена, то получаем

$$M(\psi, \varphi, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\sin\psi & -\sin\theta\cos\psi \\ \cos\theta\cos\psi\sin\psi - \sin\psi\sin\theta & \cos\varphi\cos\psi & -\sin\theta\cos\psi\sin\psi - \sin\varphi\cos\theta \\ \cos\theta\sin\psi\sin\psi + \cos\varphi\sin\theta & \sin\varphi\cos\psi & -\sin\theta\sin\psi\sin\psi + \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix}.$$

Вместо точного значения вектора $y(t) = M(\psi(t), \varphi(t), \theta(t))Y$ по показаниям построителя местной вертикали будет выдаваться вектор с компонентами $\bar{y}_1(t)$, $\bar{y}_2(t)$ и $\bar{y}_3(t)$, поэтому именно его и следует

использовать в обратной связи для наблюдателя состояния. Уравнения наблюдателя возьмем в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\psi}}{dt} &= \frac{\bar{\omega}_1\cos\hat{\theta} - \bar{\omega}_2\sin\hat{\theta} + \Omega\cos\hat{\varphi}\sin\hat{\varphi}}{\cos\hat{\varphi}} + k_{11}(\hat{y}_1(t) - \bar{y}_1(t)) + k_{12}(\hat{y}_2(t) - \bar{y}_2(t)) + k_{13}(\hat{y}_3(t) - \bar{y}_3(t)); \\ \frac{d\hat{\varphi}}{dt} &= \bar{\omega}_1\sin\hat{\theta} + \bar{\omega}_2\cos\hat{\theta} - \Omega\sin\hat{\psi} + k_{21}(\hat{y}_1(t) - \bar{y}_1(t)) + k_{22}(\hat{y}_2(t) - \bar{y}_2(t)) + k_{23}(\hat{y}_3(t) - \bar{y}_3(t)); \\ \frac{d\hat{\theta}}{dt} &= \bar{\omega}_3 + (\bar{\omega}_2\sin\hat{\theta} - \bar{\omega}_1\cos\hat{\theta})\text{tg}\hat{\varphi} - \Omega\cos\hat{\psi}\left(\cos\hat{\varphi} + \frac{\sin^2\hat{\varphi}}{\cos\hat{\varphi}}\right) + k_{31}(\hat{y}_1(t) - \bar{y}_1(t)) + k_{32}(\hat{y}_2(t) - \bar{y}_2(t)) + k_{33}(\hat{y}_3(t) - \bar{y}_3(t)). \end{aligned}$$

Здесь вектор $\hat{y}(t) = \text{col}(\hat{y}_1(t) \ \hat{y}_2(t) \ \hat{y}_3(t))$ выражается через известный вектор Y и компоненты фазового вектора уравнений наблюдателя $\hat{y}(t) = M(\hat{\psi}(t), \hat{\varphi}(t), \hat{\theta}(t))Y$.

Введем обозначения для ошибок определения углов ориентации наблюдателем: $\varepsilon_1(t) = \hat{\psi}(t) - \psi(t)$, $\varepsilon_2(t) = \hat{\varphi}(t) - \varphi(t)$, $\varepsilon_3(t) = \hat{\theta}(t) - \theta(t)$. Запишем уравнения ошибки наблюдателя в линеаризованном в окрестности режима точной ориентации виде

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \\ &= \begin{bmatrix} -k_{11}Y_2 + k_{12}Y_1 & \Omega - k_{12}Y_3 + k_{13}Y_2 & -k_{11}Y_3 + k_{13}Y_1 \\ -\Omega - k_{21}Y_2 + k_{22}Y_1 & -k_{22}Y_3 + k_{23}Y_2 & -k_{21}Y_3 + k_{23}Y_1 \\ -k_{31}Y_2 + k_{32}Y_1 & -k_{32}Y_3 + k_{33}Y_2 & -k_{31}Y_3 + k_{33}Y_1 \end{bmatrix} \varepsilon. \end{aligned}$$

С учетом равенств $Y_1(t) \equiv 0$, $Y_2(t) \equiv 0$ и $Y_3(t) \equiv -1$ получаем

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega + k_{12} & k_{11} \\ -\Omega & k_{22} & k_{21} \\ 0 & k_{32} & k_{31} \end{bmatrix} \varepsilon.$$

Матрицу обратной связи в уравнениях наблюдателя выберем следующим образом:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда линеаризованные уравнения ошибки наблюдателя примут вид

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega + 10 & 0 \\ -\Omega & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \varepsilon.$$

Для значения орбитальной угловой скорости $\Omega = 0,001163552835$ (соответствует периоду обращения

ния 90 мин) корни характеристического уравнения получаются отрицательными: -1 ; $-0,9882$; $-0,01177$. Значит, такой выбор коэффициентов обратной связи в наблюдателе должен гарантировать асимптотическое исчезновение ошибки определения углов ориентации.

1.3. Проверка работоспособности наблюдателя моделированием

Проверку работоспособности предложенного наблюдателя углов ориентации проводили на модели упругого космического аппарата из работы [6] при тех же самых исходных данных. Для стабилизации КА в режиме точной ориентации за основу брали пропорционально-дифференцирующий (ПД) закон регулирования (по углу и угловой скорости). Первоначально в предположении, что углы ориентации $\psi(t)$, $\phi(t)$ и $\theta(t)$ измеряются непосредственно и используются в обратной связи, синтез коэффи-

циентов ПД регулятора по критерию минимума ошибки стабилизации был выполнен с помощью пакета программ "ВФЛ-Редуктор" [7], реализующего технологию строгого анализа и синтеза нелинейных систем управления на основе сублинейных ВФЛ [8, 9]. При синтезе учитывались: неопределенности параметров КА, погрешности датчиков и исполнительных органов, нелинейности их характеристик, а также ограничения на управляющие воздействия. Типичные переходные процессы по углам ориентации и компонентам вектора угловой скорости полученной замкнутой системы управления (без использования наблюдателя) представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Затем была рассмотрена ситуация, когда изменения углов ориентации отсутствуют. При этом для стабилизации в режиме точной ориентации применялся тот же самый ПД регулятор, коэффициенты которого были синтезированы с помощью

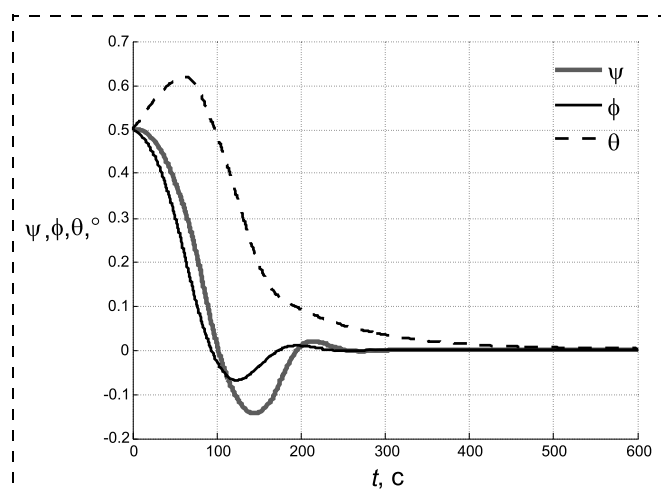


Рис. 1. Переходные процессы по углам рысканья ψ (толстая линия), крена ϕ (тонкая линия) и тангажа θ (штрихованная линия) в режиме точной ориентации для системы с измеряемыми углами ориентации (т. е. без использования наблюдателя состояния)

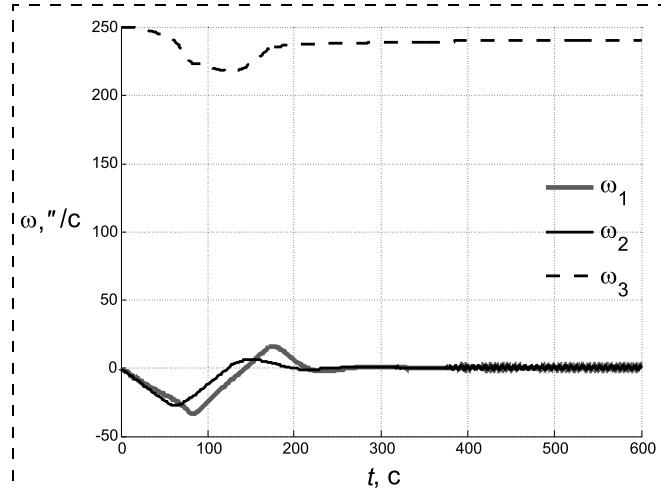


Рис. 2. Переходные процессы по компонентам вектора угловой скорости в режиме точной ориентации для системы с измерением углов ориентации (т. е. без использования наблюдателя состояния)

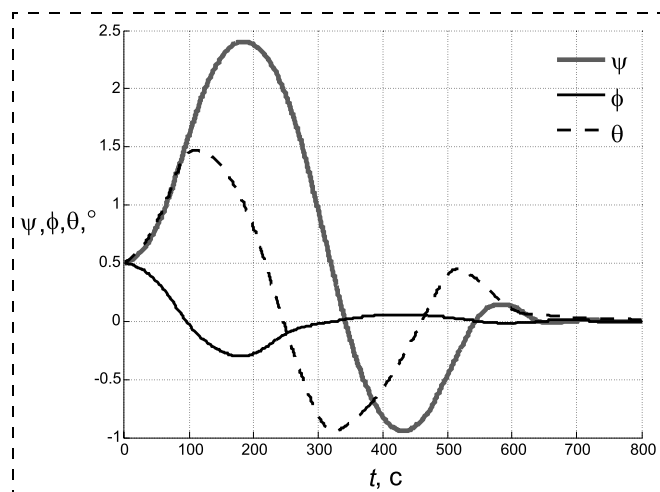


Рис. 3. Переходные процессы по углам в режиме точной ориентации для системы с наблюдателем состояния, коэффициенты которого получены модальным синтезом

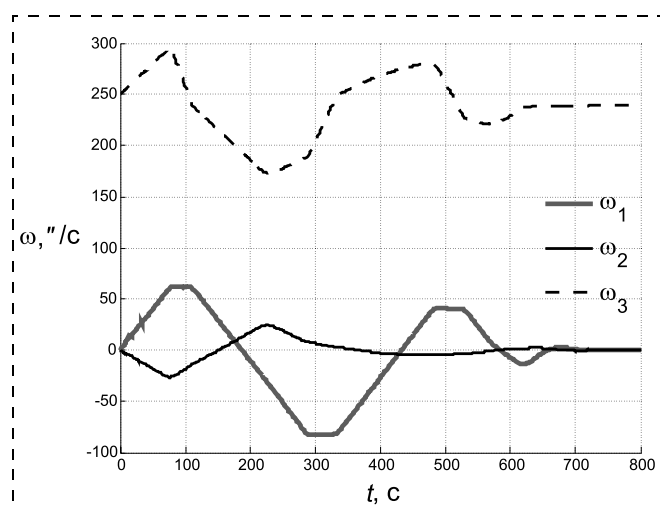


Рис. 4. Переходные процессы по компонентам вектора угловой скорости в режиме точной ориентации для системы с наблюдателем, коэффициенты которого получены модальным синтезом

пакета программ "ВФЛ-Редуктор". Вместо недоступных измерению углов ориентации в канале обратной связи были использованы выходные переменные уравнений наблюдателя. Рассмотрены два варианта выбора коэффициентов наблюдателя: посредством модального синтеза и с использованием пакета программ "ВФЛ-Редуктор".

В первом варианте была использована матрица коэффициентов наблюдателя, задаваемая равенством (3). Для системы управления с таким наблюдателем переходные процессы по углам ориентации и угловым скоростям представлены на рис. 3 и 4. Соответствующие кривые изменения ошибок наблюдателя показаны на рис. 5.

В случае использования пакета "ВФЛ-Редуктор" найденные ранее параметры алгоритма управления фиксировались, а в качестве синтезируемых параметров выбирали элементы матрицы коэффициен-

тов наблюдателя. Как и прежде, синтез проводили по критерию минимума ошибки стабилизации КА. Результаты численного моделирования синтезированной системы управления с наблюдателем представлены на рис. 6–8.

Таким образом, компьютерное моделирование подтверждает работоспособность системы стабилизации в режиме точной ориентации при невозможности измерения углов ориентации и использовании наблюдателя состояния, построенного на основе измерений ГИВУС и направления на центр Земли в связанной системе координат. При этом полученные с использованием пакета программ коэффициенты наблюдателя обеспечивают более быструю сходимость к нулю ошибок наблюдения, и, как следствие, уменьшают длительность переходных процессов по основным переменным состояния системы управления.

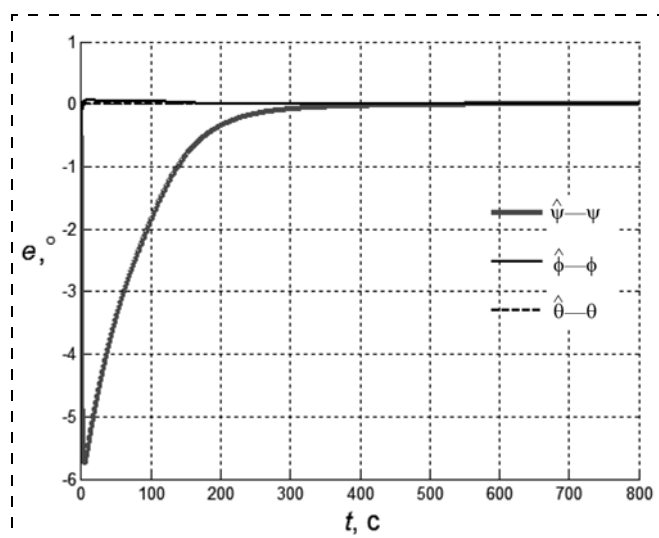


Рис. 5. Кривые изменения ошибок наблюдения для системы с наблюдателем, коэффициенты которого получены модальным синтезом

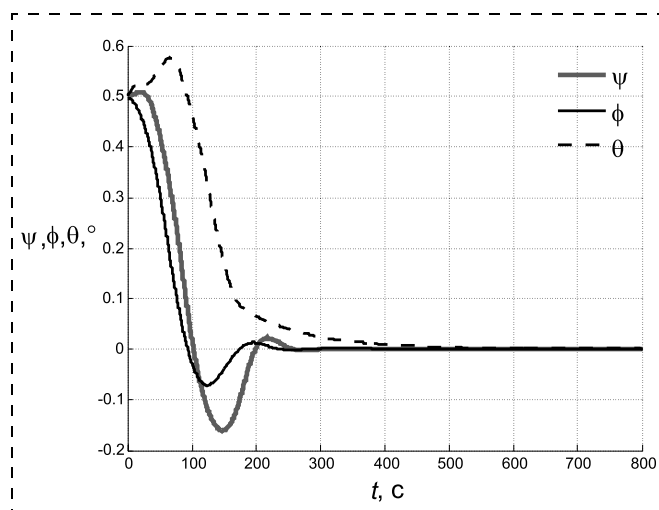


Рис. 6. Переходные процессы по углам в режиме точной ориентации для системы с наблюдателем, коэффициенты которого синтезированы с использованием пакета программ "ВФЛ-Редуктор"

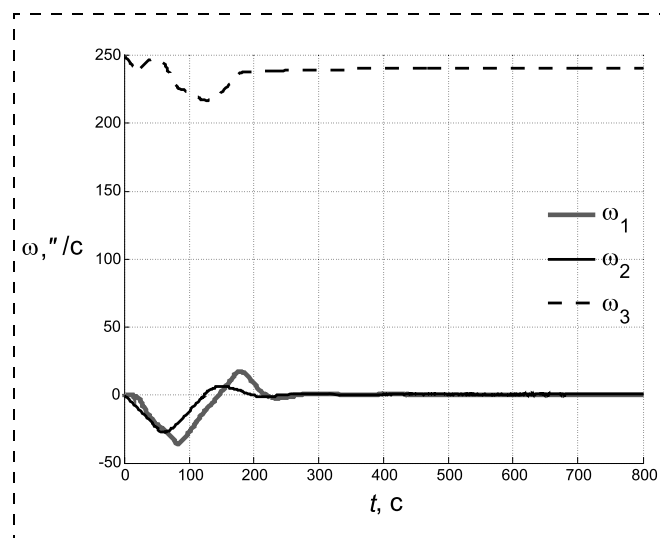


Рис. 7. Переходные процессы по компонентам вектора угловой скорости в режиме точной ориентации для системы с наблюдателем, коэффициенты которого синтезированы пакетом программ "ВФЛ-Редуктор"

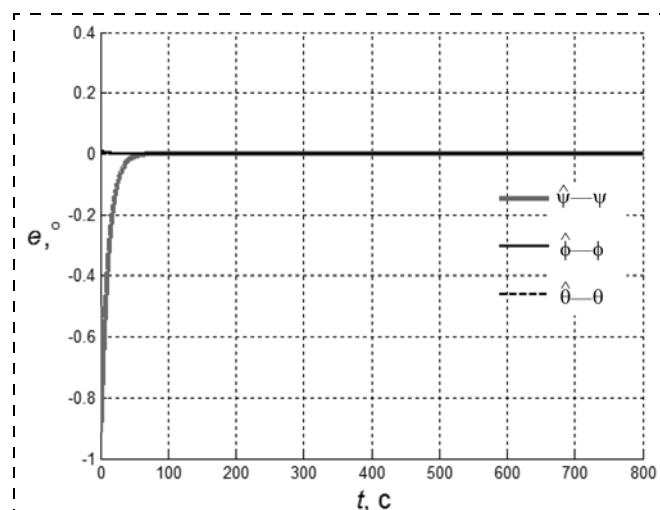


Рис. 8. Кривые изменения ошибок наблюдения для системы с наблюдателем, коэффициенты которого синтезированы пакетом программ "ВФЛ-Редуктор"

2. Об определении компонент вектора угловой скорости космического аппарата по измерениям углов ориентации

В этом разделе обсудим задачу, которая является в определенном смысле двойственной по отношению к рассмотренной выше задаче определения ориентации. Точную постановку задачи приведем в соответствии с работой [2], где рассматривались следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= \omega_x + \operatorname{tg}\psi(\omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma); \\ \dot{\vartheta} &= \frac{1}{\cos\psi}(\omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma); \\ \dot{\psi} &= \omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma;\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y)\omega_y \omega_z &= M_x; \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z)\omega_x \omega_z &= M_y; \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x)\omega_x \omega_y &= M_z.\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проекции вектора абсолютной угловой скорости аппарата на оси связанной системы координат; правые части уравнений (5) M_x, M_y, M_z суть проекции вектора управляющего момента на те же оси; J_x, J_y, J_z — главные центральные моменты инерции КА; γ, ϑ, ψ — углы крена, тангажа и курса, которые считаются доступными непосредственному измерению, в отличие от проекций вектора угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, которые полагаются не измеряемыми. Требуется разработать способ определения текущих значений угловых скоростей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ по измеренным значениям углов ориентации γ, ϑ, ψ .

В работе [2] для решения данной задачи было предложено строить наблюдатель состояния на основе пошаговой линеаризации полной нелинейной системы уравнений (4), (5) и построения для каждого шага соответствующего линейного наблюдателя. Отметим, что для реальных спутников правые части уравнений (5) не сводятся только к управляющему моменту, а содержат еще слагаемые, зависящие от дополнительных компонент вектора состояния, соответствующих вектору упругих деформаций [3]. Так как эти "упругие" координаты вектора состояния обычно непосредственному измерению не доступны, то построение наблюдателя состояния способом, указанным в работе [2], может оказаться затруднительным. Поэтому приведем альтернативный вариант решения изучавшейся в работе [2] задачи, основанный на использовании только точно известных кинематических уравнений (4).

Из уравнений (4) легко находим

$$\begin{aligned}\omega_x &= \dot{\gamma} - \dot{\vartheta} \sin\psi, \\ \omega_y &= \dot{\vartheta} \cos\psi \sin\gamma + \dot{\psi} \cos\gamma, \\ \omega_z &= \dot{\vartheta} \cos\psi \cos\gamma - \dot{\psi} \sin\gamma.\end{aligned}\quad (6)$$

Таким образом, задача свелась к вычислению в режиме реального времени производных $\dot{\gamma}, \dot{\vartheta}, \dot{\psi}$ от углов ориентации γ, ϑ, ψ по данным их измерений.

Современные астродатчики выдают измерения углов ориентации с высокой частотой и точностью [10], разработаны надежные и быстродействующие алгоритмы сглаживания данных измерений с помощью аппроксимации обычными и тригонометрическими полиномами [11]. Используя символьное дифференцирование аппроксимирующих полиномов, по формулам (6) можно вычислять текущие значения компонент вектора угловой скорости. В качестве примера нами рассматривались уравнения (4), (5) с теми же самыми значениями моментов инерции и начальными условиями, что и в работе [2]. При этом предполагалось, что управляющий момент выбирается по принципу обратной связи [12] так, чтобы обеспечить асимптотическую устойчивость решения $\omega_x = \omega_y = 0, \omega_z = \Omega = 5 \cdot 10^{-4}$ рад/с для системы (5). В канале обратной связи вместо недоступных измерению истинных значений угловых скоростей использовались их приближенные значения, вычисляемые по формулам (6).

На рис. 9 сплошной жирной линией показана кривая изменения составляющей ω_z истинного вектора угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, и тонкой ломаной линией показана соответствующая кривая, вычисленная по формулам (6). Период съема информации об углах ориентации считался равным $h = 0,25$ с, точность измерения (КВО) принималась равной $1'$, аппроксимирующий полином строился методом наименьших квадратов по восьми последовательным измерениям, непосредственно предшествующим текущему моменту.

Для других двух компонент вектора угловой скорости кривые аналогичны. Как видно из рис. 9, компоненты вектора угловой скорости восстанавливаются по формулам (6) достаточно хорошо. Поскольку точность измерения для реальных приборов типа БОКЗ-2М существенно выше $1'$ и составляет доли угловой секунды [10], то и восстановление угловых скоростей по таким измерениям будет происходить существенно точнее. Например, при точности измерения углов в $1''$ тонкая кривая на рис. 9

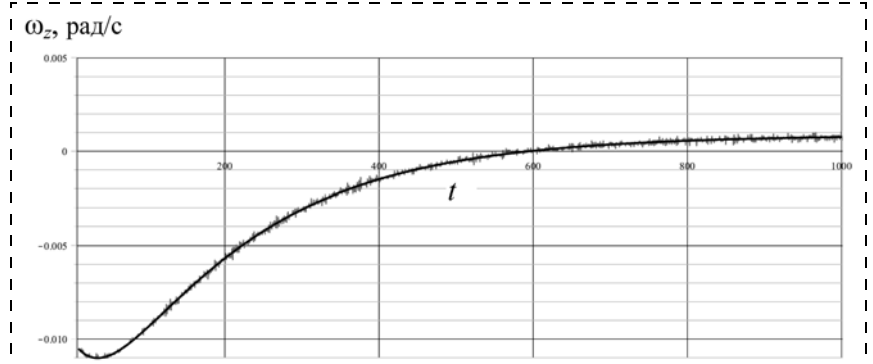


Рис. 9. Кривая изменения компоненты ω_z вектора угловой скорости (гладкая жирная линия) и ее аппроксимация на основе (6) по измерениям углов ориентации (тонкая ломаная линия, создающая "дрожание" вокруг жирной линии)

просто сливается с жирной и становится незаметной. Средняя ошибка определения угловой скорости расчетом по формулам (6) при этом составляет около 0,01 °/ч, что уже сопоставимо с точностью прямых измерений угловой скорости с помощью ГИВУС [4].

Заключение

В статье предложен подход к решению задачи определения углового положения КА в режиме точной ориентации в орбитальной системе координат по данным гироскопического измерителя вектора угловой скорости и построителя местной вертикали, основанный на применении наблюдателя состояния.

Заметим, что предложенный подход может успешно применяться для решения задач ориентации и стабилизации и в других подобных ситуациях, когда орбита спутника не является круговой, когда вместо датчика местной вертикали используется солнечный датчик и т.д.

Список литературы

1. Бранец В. Н., Платонов В. Н., Сумароков А. В., Тимаков С. Н. О стабилизации спутника связи, несущего маховики, без использования датчиков углов и угловых скоростей // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 1. С. 106—116.

2. Зубов И. Е., Микрин Е. А., Олейник А. С., Рябченко В. Н. Алгоритмы синтеза линейных наблюдателей для нелинейных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 3—16.

3. Акуленко Л. Д., Крылов С. С., Марков Ю. Г., Тун Тун Вин, Филиппова А. С. Динамика космического аппарата с упругими и диссипативными элементами в режиме ориентации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5. С. 106—115.

4. URL: http://www.tsenki.com/production_technologies/hiroscopic/control_syst_ems/gyroscopic_angular_velocity_meters/

5. URL: <http://geofizika-cosmos.ru/napravleniya-deyatelnosti/optiko-elektronnye-pribory-orientacii-i-navigacii-kosmicheskikh-apparatov/test-3.html>

6. Козлов Р. И. Применение вектор-функции Ляпунова для исследования точности гироскопической стабилизации космического аппарата // Прямой метод в теории устойчивости и его приложения. Ред. В. М. Матросов, Л. Ю. Анапольский. Новосибирск: Наука. 1981. С. 179—195.

7. Козлов Р. И., Банщиков А. В., Ульянов С. А., Хмельнов А. Е. Программный модуль для качественного исследования непрерывно-дискретных динамических систем ВФЛ-РЕДУКТОР-НД. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2007613833 от 07.09.2007.

8. Абдуллин Р. З., Анапольский Л. Ю., Земляков А. С. и др. Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости. М.: Наука, 1987. 312 с.

9. Матросов В. М., Козлов Р. И., Матросова Н. И. Теория устойчивости многокомпонентных нелинейных систем. М.: Физматлит, 2007. 184 с.

10. URL: http://www.iki.rssi.ru/ofo/page_navig.html

11. Аванесов Г. А., Красиков В. А., Никитин А. В., Сазонов В. В. Оценка точности определения параметров ориентации осей системы координат астроизмерительного прибора БОКЗ-М по экспериментальным данным // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2010. № 74. 37 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-74>.

12. Зубов В. И. Проблема устойчивости процессов управления. Л.: Судостроение, 1980. 256 с.

On Spacecraft Attitude Determination and Stabilization Using State Observers

A. A. Kosov, aakosov@yandex.ru✉, S. A. Ul'yanov, sau@icc.ru,

Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, Russian Federation

Corresponding author: Kosov Alexander A., Ph. D., Leader Researcher, Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033, Russian Federation, e-mail: aakosov@yandex.ru

Received on November 05, 2015

Accepted on November 16, 2015

For spacecrafts with long operational life, the development of reserve ways for maintaining exact three-axis orientation, when there is no opportunity to use measurements of the full state vector, is a topical problem. In such cases, state observers are usually applied for asymptotic estimation (restoration) of unmeasured components of the state vector and subsequent use of the received estimations in the feedback path. In this article, we consider the problem of asymptotic estimation of the three angles of orientation, which are inaccessible to direct measurement, in the fine orientation mode in the orbital reference system by means of a state observer. Data from the gyroscopic angular velocity measuring device and from the sensor of a local vertical are used in the observer equations. Feedback coefficients for the observer, which provide attenuation of the estimation error, are obtained. Efficiency of the observer is validated by numerical simulation of the control system with the observer designed for a satellite with elastic elements. For the case of failure of the gyroscopic angular velocity measuring device, we also consider the problem of determination of angular velocity vector components on the basis of measurements of the angles of orientation obtained from high-precision star sensors. Here, the state observer is proposed to compute derivatives of the measured angles via polynomial approximation of measurements by using the method of least squares.

Keywords: spacecraft, orientation, observer of a state, asymptotic estimation, control, stabilization.

Acknowledgement: The work was partially supported by the RFBR (project № 13-08-00948 and № 15-08-06680).

For citation:

Kosov A. A., Ul'yanov S. A. On Spacecraft Attitude Determination and Stabilization Using State Observers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 267—273.

DOI: 10.17587/mau/17. 267-273

References

1. Branets V. N., Platonov V. N., Sumarokov A. V., Timakov S. N. O stabilizatsii sputnika svyazi, nesushchego makhoviki, bez ispol'zovaniya datchikov uglov i uglovyykh skorostei (Stabilization of a Wheels Carrying Communication Satellite without Angle and Angular Velocity Sensors), *Journal of Computer and System Sciences International*, 2008, Vol. 47, No. 1, pp. 118—128.

2. Zubov I. E., Mikrin E. A., Oleinik A. S., Ryabchenko V. N. *Algoritmy sinteza lineinykh nabljudatelei dlja nelineinykh dinamicheskikh system* (Algorithms for the Synthesis of Observers for Nonlinear Dynamical Systems), *Journal of Computer and System Sciences International*, 2014, Vol. 53, No. 5, pp. 623–635.

3. Akulenko L. D., Krylov S. S., Markov Yu. G., Win T. T., Filippova A. S. *Dinamika kosmicheskogo apparata s uprugimi i dissipativnymi elementami v regime orientacii* (Dynamics of Spacecraft with Elastic and Dissipative Elements in the Attitude Control Mode), *Journal of Computer and System Sciences International*, 2014, Vol. 53, No. 5, pp. 723–732.

4. available at: http://www.tsenki.com/production_technologies/hiroscopic/control_systems/gyroscopic_angular_velocity_meters/

5. available at: <http://geofizika-cosmos.ru/napravleniya-deyatelnosti/optiko-elektronnye-pribory-orientacii-i-navigacii-kosmicheskikh-apparatov/test-3.html>

6. Kozlov R. I. *Primenenie vektor-funkcii Ljapunova dlja issledovaniya tochnosti giroskopicheskoi stabilizacii kosmicheskogo apparata* (Application of vector Lyapunov functions to investigation of accuracy of gyroscopic stabilization of a spacecraft), *Direct method in the theory of stability and its application*, V. M. Matrosov, L. Yu. Anapol'sky Ed., Novosibirsk, Nauka, 1981, pp. 179–195 (in Russian).

7. Kozlov R. I., Bانشchikov A. V., Ul'yanov S. A., Khmel'nov A. E. *Programmyj modu V dlja kachestvennogo issledovaniya nepreryvno-dis-*

kretnykh dinamicheskikh sistem VFL-REDUKTOR-ND (Software for qualitative analysis of discrete-continuous dynamical systems VLF-Reductor-DC), *Certificate of Official Registration of Computer Program* no. 2007613833, 07.09.2007 (in Russian).

8. Abdullin R. Z., Anapolsky L. Yu., Voronov A. A., Zemljakov A. S., Kozlov R. I., Malikov A. I., Matrosov V. M. *Metod vektornykh funkcij Ljapunova v teorii ustojchivosti* (Vector Lyapunov functions method in stability theory), Moscow, Nauka, 1987, 312 p. (in Russian).

9. Matrosov V. M., Kozlov R. I., Matrosova N. I. *Teorija ustojchivosti mnogokomponentnykh nelinejnykh system* (Theory of stability of multicomponent nonlinear systems), Moscow, Fizmatlit, 2007, 184 p. (in Russian).

10. available at: http://www.iki.rssi.ru/oyo/page_navig.html (in Russian).

11. Avanesov G. A., Krasikov V. A., Nikitin A. V., Sazonov V. V. *Ocenka tochnosti opredeleniya parametrov orientacii osej sistemy koordinat astroizmeritel'nogo pribora BOKZ-M po jeksperimental'nym dannym* (Accuracy estimation of determining attitude of coordinate systems of the star sensor BOKZ-M by experimental data), available at <http://library.keldysh.ru/prepnnt.asp?id=2010-74> (in Russian).

12. Zubov V. I. *Problema ustojchivosti processov upravleniya* (Stability problem for control processes), Leningrad, Sudostroenie, 1980, 256 p. (in Russian).

УДК 004.9:621.396.96

DOI: 10.17587/mau.17.273-281

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,
Фам Фыонг Кыонг, стажер, cuongbkedu@yahoo.com,
МГТУ МИРЭА

Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей

Обсуждается проблема автоматического распознавания воздушных целей на основе анализа их радиолокационных дальностных портретов. Рассматриваются и решаются вопросы конструирования информативных признаков в системах распознавания, представляющих морфологические, геометрические и вейвлетные характеристики дальностных портретов.

Ключевые слова: распознавание воздушных целей, радиолокационные дальностные портреты, формирование информативных признаков, морфологические, геометрические и вейвлетные признаки

Радиолокация решает задачи радиолокационного наблюдения — обнаружение объектов (целей) и определение их местоположения и параметров движения в пространстве с помощью радиотехнических средств и методов [1, 2]. Устройствами такого назначения являются радиолокационные станции (РЛС). В области активной радиолокации с пассивным ответом объект облучается радиоволнами, посылаемыми РЛС, в результате чего возникают отраженные от него сигналы. Завершающим этапом радиолокационного наблюдения является распознавание целей. Оно осуществляется на основе анализа характеристик эхо-сигналов при их обработке в РЛС.

Одно из актуальных направлений в теории и практике автоматического распознавания протяженных воздушных целей связано с анализом их радиолокационных дальностных портретов (ДП), называемых в англоязычной литературе "range profile". Современное состояние данной области исследований представляют работы [3–15].

Процедура радиолокационного распознавания включает последовательное решение двух задач. Первая задача состоит в формировании классификационных признаков по данным радиолокационного наблюдения, позволяющих отличать радиолокационные объекты друг от друга. Вторая задача — идентификация объектов наблюдения по совокупности полученных признаков.

Надежность распознавания в значительной мере зависит от выбора системы классификационных признаков объектов наблюдения. В настоящей статье исследуются вопросы конструирования морфологических, геометрических и вейвлетных характеристик ДП воздушных целей для решения задач радиолокационного распознавания.

В выполненных исследованиях использовалась программа моделирования ДП воздушных целей "Backscattering simulation", разработанная Я. Д. Ширманом и его сотрудниками [16].

Радиолокационные дальностные портреты воздушных целей

Воздушные цели (ВЦ) могут иметь различную физическую природу, к примеру это могут быть самолеты, ракеты, метеозонды, облака, дождь, турбулентности атмосферы и т.п.

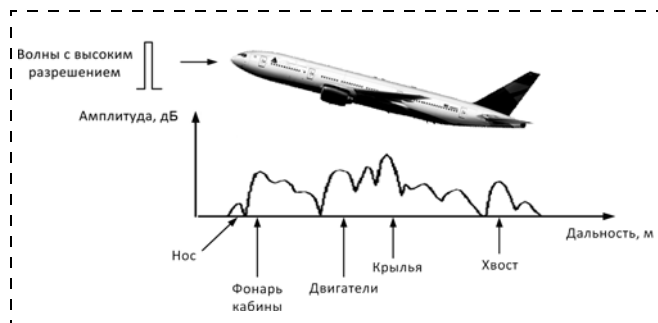


Рис. 1. Дальностный портрет ЛА

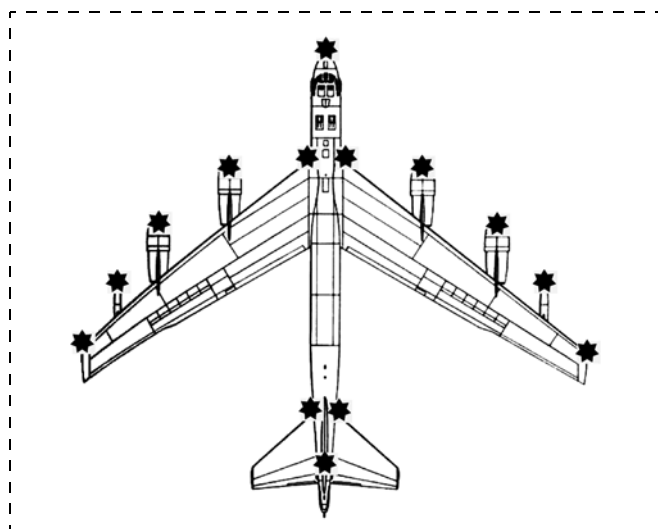


Рис. 2. Основные точки рассеивания самолета В-52

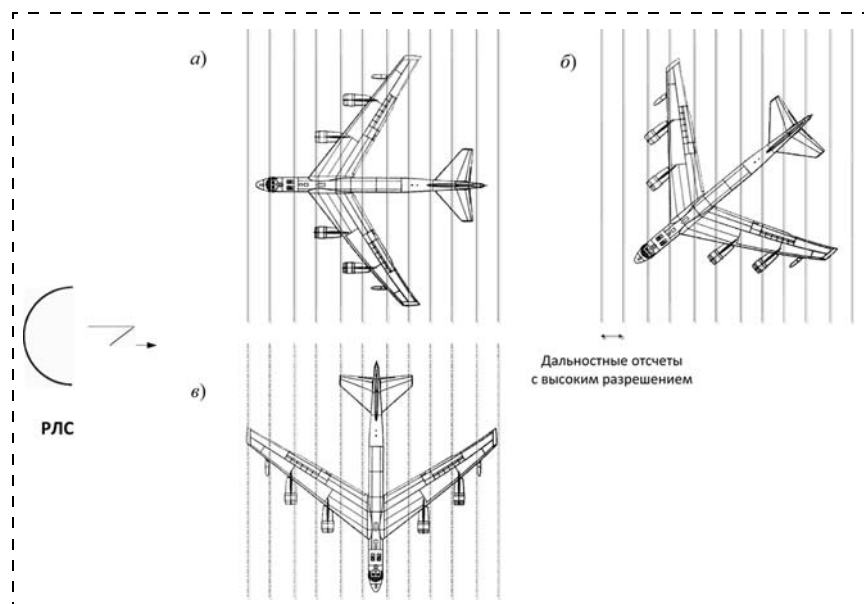


Рис. 3. Влияние частей самолета на дальностные отсчеты при изменении курсового угла

При распознавании ВЦ в активной РЛС используются характеристики создаваемого целями поля вторичного излучения в дальней зоне РЛС. Эти характеристики, как правило, зависят от ориентации цели, параметров ее движения, размеров, типов установленных на ней двигателей и режимов их работы, параметров вибраций корпуса, а также от характеристик зондирующих сигналов, способа обработки принимаемых сигналов и т. д. [17, 4].

РЛС с высокой разрешающей способностью и точностью по дальности позволяет воспроизвести *профиль цели по дальности*.

Дальностный портрет (дальностный профиль) является одномерной характеристикой радиолокационных целей. Это отклик объекта наблюдения при облучении широкополосным импульсом во временной области. Рис. 1 иллюстрирует принцип формирования радиолокационного дальностного портрета летательного аппарата (ЛА) [15].

На каждом дальностном отсчете амплитуда полученного сигнала представляет мощность отраженного сигнала. На рис. 1 показаны основные части самолета, которые создают ДП.

Отметим, что видимая длина объектов на ДП может отличаться от его физической длины из-за двух эффектов. Сигнал, отражающийся в сторону РЛС, может далее подвергаться отражению от других рассеивателей цели, вследствие чего повышается временная задержка, которая и появляется в структуре ДП. Второй эффект обусловлен сокрытием одних частей самолета другими: некоторая часть самолета может быть скрыта его большей частью, которая находится между первой и РЛС. В итоге уменьшается энергия радиоволн, которые дойдут до цели и будут отражены обратно к РЛС. Например, фюзеляж или крылья самолета могут скрывать его хвост.

Особенности рассеяния радиоволн воздушными целями

Радиолокационные цели могут рассматриваться как множество точечных *отражателей* (рассеивателей) радиоволн [18], таких как поверхности, края, углы (двугранные углы), трехгранники, впадины и пр. Характеристика каждого отдельного рассеивателя может быть представлена в виде полярной диаграммы, представляющей зависимость отраженной амплитуды от азимута и угла возвышения. Соответственно этому ДП цели может быть разложен на *элементарные рассеяния*, т. е. приближенно составлен как суперпозиция отражений радиоволн от элементарных рассеивателей, каждый из которых соответствует некоторой одной детали цели. Согласно [15] самолеты могут насчитывать до 30 таких рас-

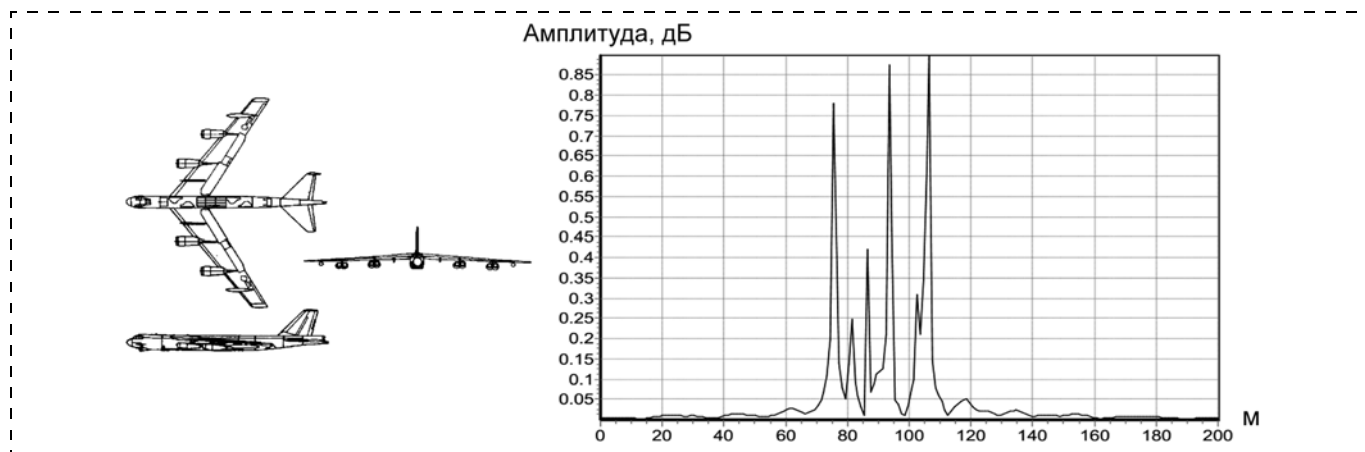


Рис. 4. Дальностный портрет самолета В-52

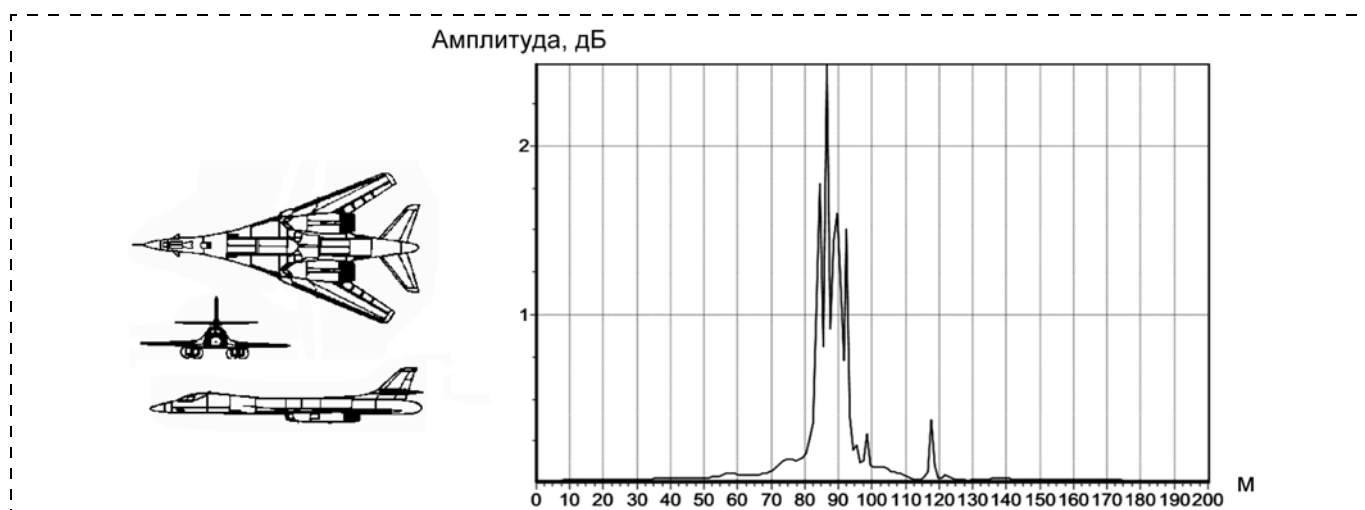


Рис. 5. Дальностный портрет самолета В-1В

сеивателей. К примеру, для бомбардировщика В-52, представленного на рис. 2, в качестве основных рассеивателей выделены нос, двигатели, несущая, корневая и рулевая части крыла, а также пилоны на крыльях.

Таким образом, эффект отражения радиоволн от ВЦ в сторону РЛС зависит от *курсового угла* (КУ) — угла в плоскости истинного горизонта наблюдателя между продольной осью ЛА и направлением на наблюдателя. Этот эффект демонстрирует рис. 3. На рис. 3, а дальностные отсчеты при данном КУ распределены вдоль оси симметрии фюзеляжа. Вследствие этого можно предусмотреть, какие части самолета соответствуют каждому дальностному отсчету. Напротив, при КУ, отвечающем рис. 3, б, в дальностные отсчеты, обусловленные отдельными частями фюзеляжа, также вносят свой вклад соответствующие части крыльев.

Итак, ДП определяется уникальным набором вкладов в него разных частей ВЦ, зависящих от курсового угла. При изменении КУ получаются разные ДП и изменяется степень сходства (корреляции) между дальностными профилями различных ВЦ.

На рис. 4 и 5 в качестве примера приведены ДП бомбардировщиков В-52 и В-1В Lancer для КУ = 20°.

Схема распознавания воздушных целей

Процедура распознавания ВЦ на основе анализа их дальностных портретов предполагает решение двух подзадач:

- 1) формирование комплекса информативных признаков ВЦ по ее ДП;
- 2) классификацию ВЦ на основе полученных информативных признаков.

Введем обозначения:

- Ω — множество наблюдаемых ВЦ;
- $\omega \in \Omega$ — объекты наблюдения;
- AC — алфавит классов ВЦ:

$$AC = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m\};$$

- Θ — алфавит меток (имен) классов ВЦ:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\};$$

- $\theta_i \in \Theta$ ($i = 1: m$) — метки классов;
- Π — множество дальностных портретов ВЦ;
- $\pi \in \Pi$ — дальностные портреты;
- X — признаковое пространство ВЦ.

Пространство X определяется выбором *информативных признаков* $x_1, x_2, \dots, x_n$. При этом объекты наблюдения представляются кортежем

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Каждая ВЦ относится к некоторому классу и, следовательно, ей априори соответствует определенная метка класса $\theta \in \Theta$:

$$\omega \rightarrow \theta.$$

Этапы распознавания ВЦ иллюстрирует схема на рис. 6.



Рис. 6. Схема распознавания воздушных целей

Алгоритм классификации осуществляет функциональное преобразование

$$\mathbf{x} \rightarrow \hat{\theta},$$

т. е. для каждого входного образа $\mathbf{x} \in X$ вычисляет соответствующую метку класса $\hat{\theta} \in \Theta$, которая и присваивается наблюдаемой ВЦ.

В случае правильной классификации

$$\hat{\theta} = \theta.$$

Надежность процедуры распознавания в значительной мере зависит от выбора системы информативных признаков. В настоящей работе для идентификации ДП ВЦ предлагается применять следующие группы признаков:

- морфологические;
- геометрические;
- вейвлетные.

Далее ДП будем обозначать через π и рассматривать как одномерные функции пространственной координаты

$$A = \pi(\xi),$$

где ξ — дальности отсчетов ВЦ (м); A — амплитуда отклика (дБ).

Морфологические информативные признаки

Под морфологическими признаками понимаются признаки, которые описывают структуру ДП.

Отметим важную особенность ДП ЛА — они имеют импульсные составляющие различной амплитуды, обусловленные действием элементарных рассеивателей, что наглядно иллюстрируется сигналами, представленными на рис. 4 и 5. Под *пиком* импульсного сигнала понимается вершина импульса. Амплитуда пика — это его максимальное значение.

Посредством морфологических признаков описывается структура пиков в составе ДП.

Самым простым морфологическим признаком ДП является число пиков m в его структуре. Следует учитывать лишь *доминирующие пики*, которые значительно превышают по амплитуде шум и помехи. Наибольший из пиков — главный.

Дальнейшая характеристика ДП основана на ранжировании составляющих его пиков по амплитуде. Для анализа ДП неприемлемо прямое применение амплитудных значений пиков в силу их зависимости от ряда не учитываемых возмущающих и искажающих факторов в принимаемом эхосигнале. Набор применяемых информативных признаков должен быть инвариантным по отношению к действию данных факторов. Поэтому предлагается вместо амплитудных значений пиков применять их *ранги*. Таким образом, речь идет о структурной идентификации ДП посредством использования ранговых шкал.

Ранговые шкалы [19] относят к классу так называемых качественных шкал. В их основе лежат понятия вариационного ряда и ранжирования данных.

Поясним способ формирования классификационных признаков рангового типа. Положим, в ДП выделены m пиков с амплитудами A_i ($i \in 1:m$). Считаем, что они превышают заданный порог чувствительности, который, скажем, принимается равным 10 % от амплитудного максимума ДП. Процедура ранжирования пиков заключается в следующем. Сначала из величин A_i составляется вариационный ряд в порядке убывания. Затем элементы ряда нумеруются от 1 до m . Наконец, порядковый номер каждого элемента в вариационном ряду определяет его ранг:

$$R_i = \text{rank}(A_i).$$

В итоге получаем наборы рангов пиков

$$R = (R_1, R_2, \dots, R_m).$$

Так для ДП, представленного на рис. 4, $m = 5$, $R = (3, 5, 4, 2, 1)$.

Геометрические информативные признаки

Геометрические признаки представляют глубину и моментные характеристики ДП $\pi(\xi)$.

Определим *глубину* ДП D как расстояние между крайними отсчетами в отраженном радиосигнале. Данные отсчеты необходимо выделять на фоне помех.

Моментные характеристики ДП определяются следующим образом:

а) момент нулевого порядка:

$$M_0 = \int_0^D \pi(\xi) d\xi;$$

б) момент первого порядка:

$$M_1 = \int_0^D \xi \pi(\xi) d\xi;$$

в) положение центра тяжести ДП:

$$\xi_0 = M_1/M_0;$$

г) центральный момент p -го порядка ($p \geq 2$):

$$m_p = \int_0^D (\xi - \xi_0)^p \pi(\xi) d\xi.$$

Определенные выгоды при анализе ДП могут давать безразмерные величины, построенные по данным показателям. В частности, сюда относятся д) относительное положение центра тяжести ДП:

$$\xi'_0 = \xi_0/D;$$

е) центральные нормированные моменты:

$$\mu_p = m_p/M_0.$$

Последние инвариантны к мощности принимаемого сигнала.

К примеру, для ДП самолета В-52, представленного на рис. 4, $\xi'_0 = 0,57$, $\mu_p = 7,18$.

Вейвлетные информативные признаки

Вейвлет-анализ является мощной альтернативой анализу Фурье и дает более гибкую технику обработки сигналов [20, 21].

Одна из главных и особенно плодотворных идей вейвлетного представления сигналов заключается в их многоуровневой декомпозиции на две группы функций на каждом уровне: *аппроксимирующие* и *детализирующие*. Первые дают грубое описание сигналов, выделяя в них части с достаточно медленной динамикой, а вторые описывают составляющие с локальной и быстрой динамикой с последующим их дроблением и детализацией на последующих уровнях декомпозиции сигналов.

В основе непрерывного вейвлет-преобразования (ВП) лежит использование двух функций: масштабирующей (скейлинг-функции) $\varphi(t)$ и материнского вейвлета $\psi(t)$. Первая отвечает условию

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1$$

и позволяет получать грубое приближение (аппроксимацию) сигнала. Вторая имеет нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0,$$

и определяет детали сигнала.

ВП одномерного сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

образуемых из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$ посредством операций сдвига по аргументу (b) и изменения *масштаба* (a). Заметим, что нормы вейвлетов $\psi_{ab}(t)$ равны норме $\psi(t)$, что обеспечивает нормировочный множитель $|a|^{-1/2}$.

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $f(t) \in L_2(\mathbf{R})$ по смыслу соответствует преобразованию Фурье с заменой гармонического базиса $\exp(-j\omega t)$ на вейвлетный $\psi_{ab}(t)$:

$$w(a, b) = \langle f, \psi_{ab} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{ab}(t) dt.$$

Вейвлет-спектрограммы гораздо информативнее обычных Фурье-спектрограмм. Выбор анализирующего вейвлета определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала.

В общем случае вейвлет-преобразование на основе вейвлет-функции $\psi(t)$ способно восстановить (реконструировать) по крайней мере тонкие детали сигнала. Однако для восстановления полной формы исходного сигнала $f(t)$ приходится также прибегать к скейлинг-функции $\varphi(t)$, называемой также отцовским вейвлетом. Данная ситуация возникает не всегда, а, как правило, в случае применения ортогональных вейвлетов.

Эффективность вейвлет-анализа определяется выбором базисного вейвлета. В качестве примера рассмотрим результаты вейвлет-преобразования ДП бомбардировщика В-1В для трех вейвлетов: Морле, Добеши и "мексиканская шляпа". Графики данных вейвлетов приведены на рис. 7, а—в.

Рис. 8—10 иллюстрирует результаты вейвлет-анализа ДП самолета В-1В (см. рис. 5) для данных типов вейвлетов. Приведены графики вейвлет-ко-

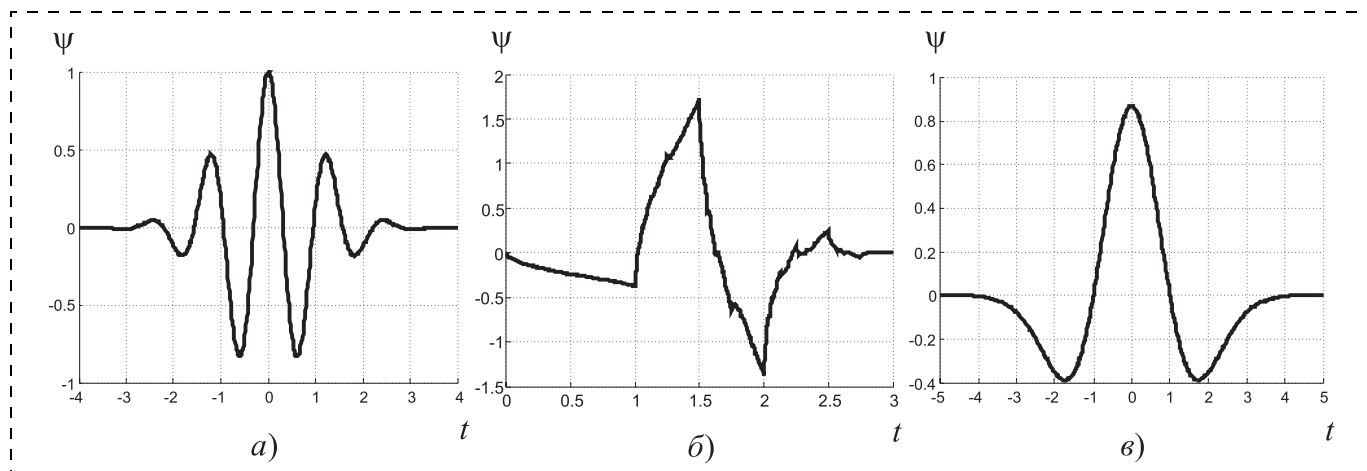


Рис. 7. Вейвлеты: а — Морле; б — Добеши; в — "мексиканская шляпа"

эффициентов $w(a, b)$ как функций параметра сдвига b для разных параметров масштаба: $a = 1, 4, 8, 16$.
 Наличие широкого набора вейвлет-функций позволяет ставить вопрос о наилучшем выборе базисного вейвлета. Его решение предлагается основывать на анализе матрицы Грама, построен-

ной из вейвлет-коэффициентов ДП классифицируемых ВЦ.
 Пусть задана система функций, определенных и интегрируемых с квадратом по Лебегу на отрезке $[a, b] \subset \mathbf{R}$:

$$\Phi = \{\varphi_i(x), i = 1:n\} \subset L_2[a, b].$$

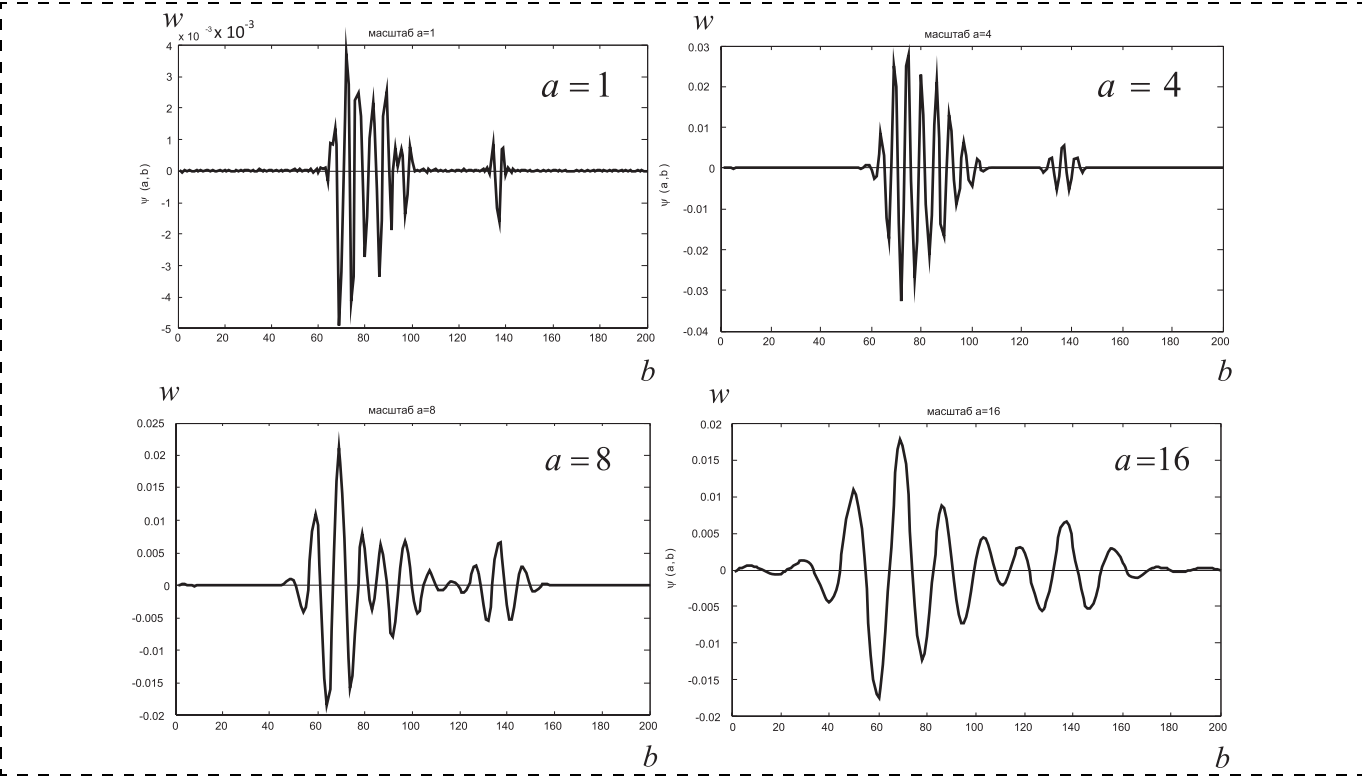


Рис. 8. Вейвлет-коэффициенты дальностного портрета — базисный вейвлет Морле

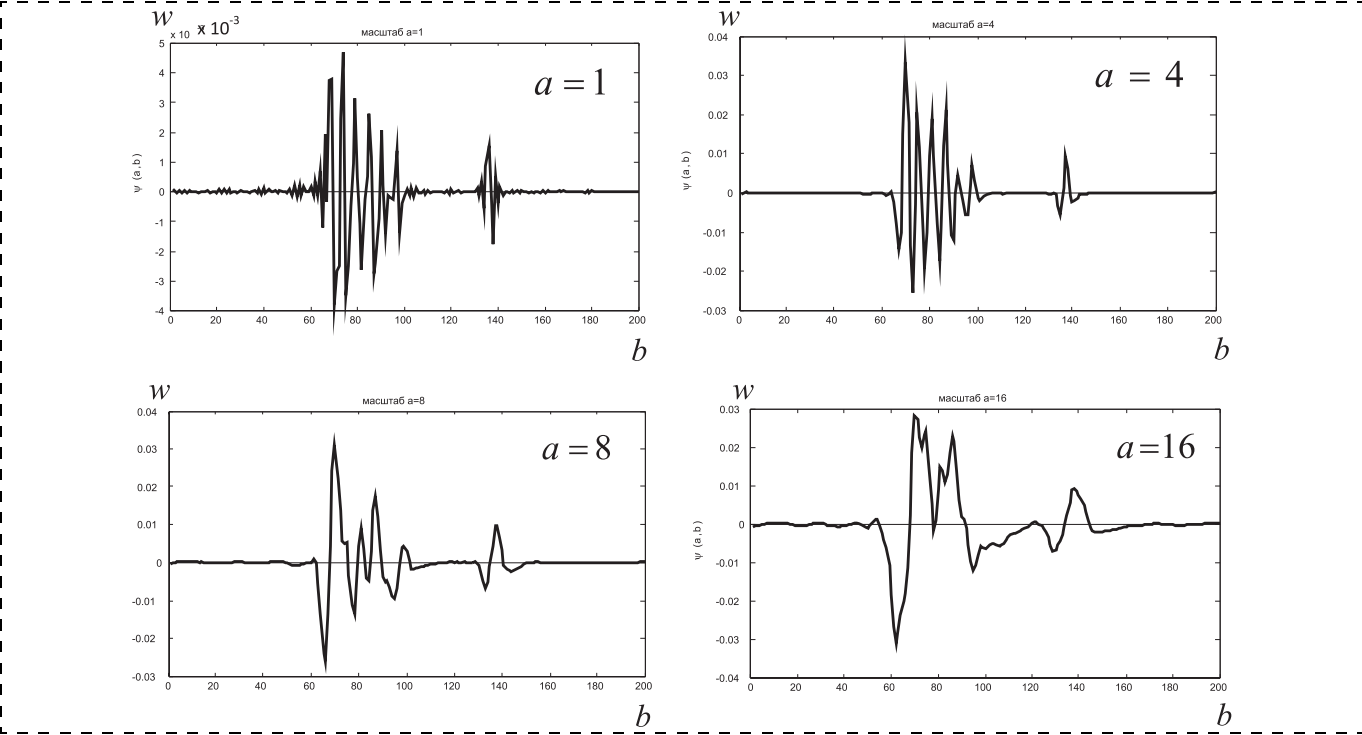


Рис. 9. Вейвлет-коэффициенты дальностного портрета — базисный вейвлет Добеши

Соответствующая ей матрица Грама [22] определяется равенством:

$$\Gamma(\Phi) = \begin{bmatrix} \langle \varphi_1, \varphi_1 \rangle & \langle \varphi_1, \varphi_2 \rangle & \dots & \langle \varphi_1, \varphi_n \rangle \\ \langle \varphi_2, \varphi_1 \rangle & \langle \varphi_2, \varphi_2 \rangle & \dots & \langle \varphi_2, \varphi_n \rangle \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \langle \varphi_n, \varphi_1 \rangle & \langle \varphi_n, \varphi_2 \rangle & \dots & \langle \varphi_n, \varphi_n \rangle \end{bmatrix}.$$

Согласно теореме Грама данная система функций является линейно зависимой, если определитель Грама равен нулю:

$$\det \Gamma(\Phi) = 0.$$

Определитель Грама позволяет выявлять факт линейной зависимости построенной системы функций. Однако для нас представляет интерес возможность оценки качества выбранного базиса Φ , которая определяется близостью матрицы Грама к вырожденности.

Как известно, необходимую оценку близости некоторой числовой квадратной матрицы A к вырожденности дает ее число обусловленности [23]:

$$\text{cond}(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|.$$

Здесь двойные прямые скобки $\|\dots\|$ обозначают норму матрицы.

Если число обусловленности матрицы A мало, то она называется *хорошо обусловленной*. Если же число обусловленности велико:

$$\text{cond}(A) \gg 1,$$

то матрица называется *плохо обусловленной*.

Например, условия плохой и хорошей обусловленности матрицы могут иметь следующий вид:

$$\text{cond}(A) \geq 10^3, \text{cond}(A) \leq 100.$$

Суть предлагаемого подхода к выбору вейвлетного базиса заключается в следующем. Считаем, что имеется P различных типов ДП. Пусть выбран базисный вейвлет $\psi(t)$, а также задан параметр масштаба a . Далее, вычисляем вейвлет-коэффициенты $w_i(a, b)$ ($i = 1:P$) для всех типов ДП и затем выполняем их нормирование. В итоге получаем систему функций

$$W(a) = \{w_1(a, b), w_2(a, b), \dots, w_P(a, b)\},$$

которые служат крупномасштабными *эталонами* распознаваемых ВЦ. Для оценки информативности данной системы функции предлагается использовать матрицы Грама.

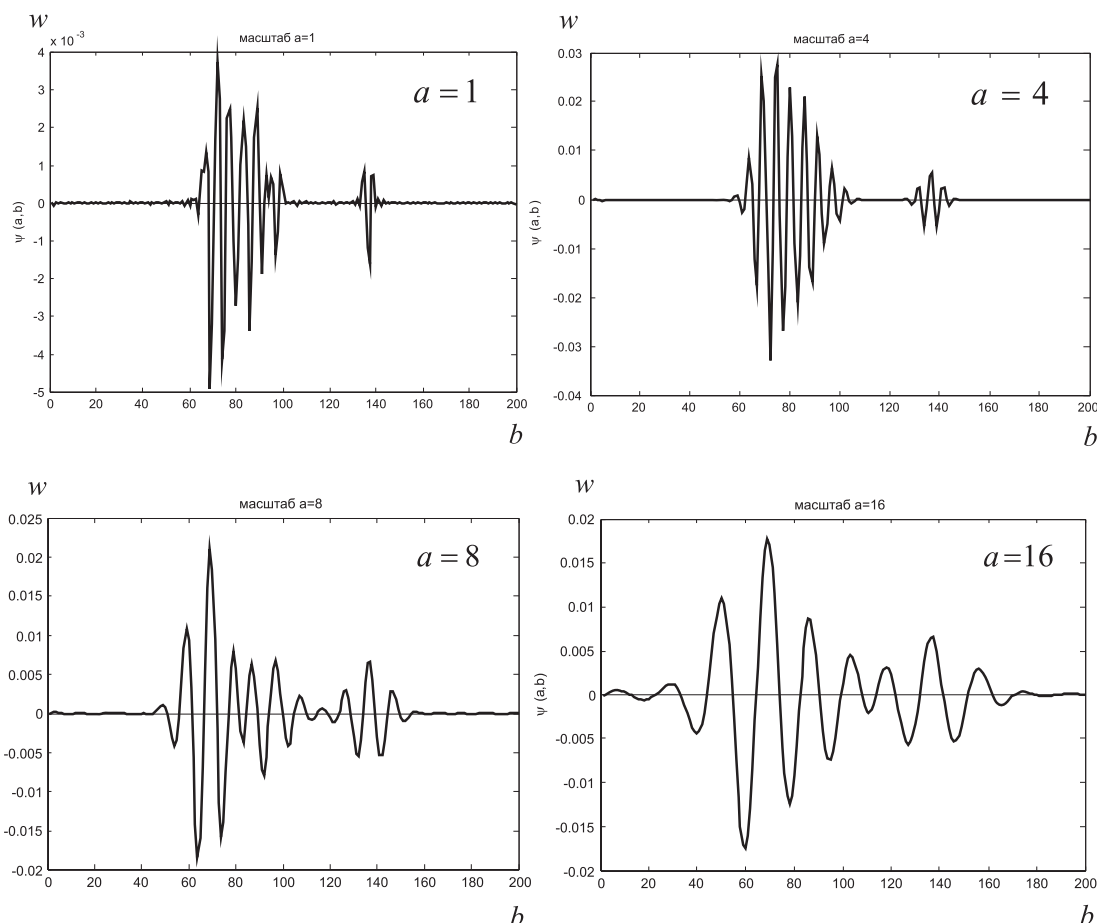


Рис. 10. Вейвлет-коэффициенты дальностного портрета — базисный вейвлет "мексиканская шляпа"

Сопоставим построенной системе функций матрицу Грама $\Gamma(W(a))$ и вычислим ее число обусловленности

$$\mu(a, \psi) = \text{cond}(\Gamma(W(a))). \quad (2)$$

Рассчитывая данный показатель для различных вейвлетов и разных параметров масштаба a , выбираем те вейвлеты, для которых данный показатель является *наименьшим*.

Приведем расчеты показателя (2) с параметром масштаба $a = 10$ для трех типов базовых вейвлетов:

- 1) вейвлет Морле: $\mu \cong 588$;
- 2) вейвлет Добеши-2: $\mu \cong 15$;
- 3) вейвлет "мексиканская шляпа": $\mu \cong 36\,799$.

В качестве вейвлетных признаков ДП $\pi(\xi)$ предлагается использовать следующие величины:

$$c(a) = \frac{\langle \pi, w_a \rangle}{\|\pi\| \cdot \|w_a\|}, \quad (3)$$

$$\text{где } \langle \pi, w_a \rangle = \int_0^D \pi(\xi) w(a, \xi) d\xi,$$

$$\|\pi\| = \sqrt{\int_0^D \pi^2(\xi) d\xi}, \quad \|w_a\| = \sqrt{\int_0^D w^2(a, \xi) d\xi},$$

вычисленные для ряда выбранных значений a .

Величина (3), очевидно, равна скалярному произведению двух функций: нормированного ДП $\pi(\xi)/\|\pi\|$ и нормированного вейвлет-коэффициента этого ДП $w(a, \xi)/\|w_a\|$. Отметим, что построенные вейвлетные характеристики $c(a)$, отвечающие различным значениям масштаба a , аналогичны амплитудам отдельных гармоник в разложении сигналов в ряд Фурье.

Выполненные исследования показывают, что использование морфологических, геометрических и вейвлетных характеристик ДП в качестве информативных признаков позволяют успешно выполнять распознавание ВЦ.

В общем случае кортеж (1) всех информативных признаков ВЦ включает все три типа характеристик ДП:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3),$$

где $\mathbf{x}_1$ — кортеж морфологических признаков; $\mathbf{x}_2$ — кортеж геометрических признаков; $\mathbf{x}_3$ — кортеж вейвлетных признаков.

Отметим, что избыточная входная информация об объектах наблюдения может существенно усложнять алгоритмы их классификации. В связи с этим несомненный научный интерес представляют вопросы оптимального комплексирования информативных признаков рассмотренного типа для ин-

женерного проектирования систем автоматического распознавания ВЦ.

Список литературы

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Советское радио, 1975. 336 с.
2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2007. 376 с.
3. Лещенко С. П. Информативность и достоверность радиолокационного распознавания воздушных целей по дальностным портретам // Збірник наукових праць ХВУ. 2001. Вип. 7 (37). С. 63—72.
4. Лещенко С. П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей // Прикладная радиоэлектроника. 2009. Т. 8, № 4. С. 490—496.
5. Тоцкий А. В., Молчанов П. А., Поспелов Б. Б. Распознавание летательных аппаратов по радиолокационным дальностным профилям // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 5 (72). С. 77—82.
6. Ширман Я. Д., Горшков С. А., Лещенко С. П., Братченко Г. Д., Орленко В. М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 11. С. 3—63.
7. Smith C. R., Goggans P. M. Radar target identification // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1993. Vol. 35, N. 2. P. 27—37.
8. Li H. J., Yang S. H. Using range profiles as feature vectors for identify aerospace objects // IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1993. Vol. 41, N. 3. P. 261—268.
9. Zyweck A., Bogner R. E. Radar target classification of commercial aircraft // IEEE Trans. Antennas Propagation. 1996. Vol. 32, N. 2. P. 598—606.
10. Jacobs S. P. et al. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range profiles // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 2000. Vol. 36, N. 2. P. 364—381.
11. Zhoum D., Liu G., Wang J. Spatio-temporal target identification method of high-range resolution radar // Pattern Recognition. 2000. Vol. 33, N. 1. P. 1—7.
12. Xian-Da Zhang, Yu Shi, Zheng Bao. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition // IEEE Trans. Signal Processing. 2001. Vol. 49, N. 9. P. 1875—1885.
13. Nelson D. E., Starzyk J. A., Ensley D. D. Iterated wavelet transformation and signal discrimination for HRR radar target recognition // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 2003. Vol. 33, N. 1. P. 52—57.
14. Lan Du, Hongway Liu, Zheng Bao, Mengdao Xing. Radar HRRP target recognition based on higher order spectra // IEEE Trans. Signal Processing. 2005. Vol. 53, No. 7. — P. 2359—2368.
15. Tait P. Introduction to radar target recognition. London: Institution of Electrical Engineers, 2005. IET radar series no. 18. 396 p.
16. Небабин В. Г., Сергеев В. В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
17. August W. R., Stephen J. H. Theory and practice of radar target identification, Artech House, 2000. 738 p.
18. Shirman Y. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Y., Sukharevskiy O. I. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking / Y. D. Shirman editor. Boston—London: Artech house, 2002. 294 p.
19. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982. 198 с.
20. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
21. Соломенцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.
22. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. 636 с.
23. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высш. шк., 2002. 840 с.

Methods for Formation of the Information Signatures of the Radar Range Profiles of the Aerial Targets

A. B. Filimonov, filimon_ab@mail.ru✉, Pham Phuong Cuong, cuongbkedu@yahoo.com, Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Filimonov Aleksandr B.**, D. Sc., Professor, Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: filimon_ab@mail.ru

Received on December, 19, 2015

Accepted on December 27, 2015

Development of the theory and practice of the automatic radar object recognition is based on the latest computer technologies, system analysis and processing. One of the modern trends in the field of the aerial targets recognition is related to the analysis of the radar range profiles (RP). The authors discuss the idea of presentation of the radar aerial targets as a set of scatter points of the radio waves, which depends on its structural features, as it is shown in presentation of RP as a superposition of the elementary scatters. The procedure of the radar object recognition includes two sequential tasks. The first task is to build the classification signatures of the objects using the radar data, which allows us to distinguish the objects, one from another. The second task is identification of the observed objects by gathering of the obtained signatures. The reliability of the recognition depends mainly on the choice of the classification signatures. The article shows that a solution for recognition of the aerial targets can be based on the analysis of the morphological, geometrical and wavelet characteristics of the range profiles. The methods for formation of the corresponding information features are discussed in this article. Construction of the morphological signatures is based on the analysis of the impulse components in the RP structure: the composition and the results, ranking by the amplitude. The geometrical information signatures of RP include such indicators as its depth, center of gravity and moments of the zero, first and higher orders. A possibility of application of a continuous wavelet transformation is presented in the analysis of the range profile features. The wavelet analysis allows us to detect the local features of the signals. It is a powerful alternative to Fourier analysis, and it ensures a more flexible technique for processing of the signals. The effectiveness of the wavelet analysis depends substantially on the selection of the basic wavelet. The article raises the question of the best choice of the basic wavelet. The solution is proposed upon the analysis of the Gram matrix characteristics, which are constructed from the wavelet coefficients of the aerial target RP. In the implemented studies, all the necessary empirical data of the RRP aircraft were obtained by using Backscattering Simulation, simulation programs of the RP aerial targets, developed by Y. D. Shirman and his staff.

Keywords: radar observation, aerial target recognition, radar range profiles, information signature formation, morphological, geometrical and wavelet signatures.

For citation:

Filimonov A. B., Pham Phuong Cuong. Methods for Formation of the Information Signatures of the Radar Range Profiles of the Aerial Targets, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 273–281.

DOI: 10.17587/mau.17.273-281

References

1. Belocerkovskij G. B. *Osnovy radiolokacii i radiolokacionnye ustroystva* (Radar basics and radar devices), Moscow, Sovetskoe radio, 1975, 336 p. (in Russian).
2. Bakulev P. A. *Radiolokacionnye sistemy* (Radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2007, 376 p. (in Russian).
3. Leshchenko S. P. *Informativnost' i dostovernosf radiolokacionnogo raspoznavaniya vozdušnyh celej po dal'nostnym portretam* (Information capability and reliability of aerial target radar recognition), *Zbirnik Naukovih Prac' HVU*, 2001, Iss. 7 (37), pp. 63–72 (in Ukrainian).
4. Leshchenko S. P. *Razvitie teorii i tekhniki radiolokacionnogo raspoznavaniya vozdušnyh celej* (Development of the theory and technology of aerial target radar recognition), *Prikladnaya Radioelektronika*, 2009, vol. 8, no. 4, pp. 490–496 (in Russian).
5. Tockij A. V., Molchanov P. A., Pospelov B. B. *Raspoznavanie letatel'nyh apparatov po radiolokacionnym dal'nostnym profilam* (Aircraft recognition using radar range profiles), *Aviacionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 2010, no. 5 (72), pp. 77–82 (in Russian).
6. Shirman Ya. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Bratchenko G. D., Orlenko V. M. *Metody radiolokacionnogo raspoznavaniya i ih modelirovanie* (Methods of radar recognition and simulation), *Zarubezhnaya Radioelektronika*, 1996, no. 11, pp. 3–63 (in Russian).
7. Smith C. R., Goggans P. M. Radar target identification, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1993, vol. 35, no. 2, pp. 27–37.
8. Li H. J., Yang S. H. Using range profiles as feature vectors for identify aerospace objects, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1993, vol. 41, no. 3, pp. 261–268.
9. Zyweck A., Bogner R. E. Radar target classification of commercial aircraft, *IEEE Trans. Antennas Propagation*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 598–606.
10. Jacobs S. P., O'Sullivan A. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range profiles, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 364–381.
11. Zhoum D., Liu G., Wang J. Spatio-temporal target identification method of high-range resolution radar, *Pattern Recognition*, 2000, vol. 33, no. 1, pp. 1–7.
12. Xian-Da Zhang, Yu Shi, Zheng Bao. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition, *IEEE Trans. Signal Processing*, 2001, vol. 49, no. 9, pp. 1875–1885.
13. Nelson D. E., Starzyk J. A., Ensley D. D. Iterated wavelet transformation and signal discrimination for HRR radar target recognition, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 2003, vol. 33, no. 1, pp. 52–57.
14. Lan Du, Hongway Liu, Zheng Bao, Mengdao Xing. Radar HRRP target recognition based on higher order spectra, *IEEE Trans. Signal Processing*, 2005, vol. 53, no. 7, pp. 2359–2368.
15. Tait P. Introduction to radar target recognition, London, Institution of Electrical Engineers, 2005, *IET radar series*, no. 18, 396 p.
16. Nebabin V. G., Sergeev V. V. *Metody i tekhnika radiolokacionnogo raspoznavaniya* (Methods and technology of radar recognition), Moscow, Radio i svyaz', 1984, 152 p. (in Russian).
17. August W. R., Stephen J. H. Theory and practice of radar target identification, Artech House, 2000, 738 p.
18. Shirman Y. D., Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Y., Sukharevskiy O. I., Y. D. Shirman editor. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking, Boston—London, Artech house, 2002, 294 p.
19. Runion R. *Spravochnik po neparametricheskoj statistike* (Non-parametric Statistics References), Moscow, Finansy i statistika, 1982, 198 p. (in Russian).
20. D'yakonov V. P. *Vejvlety. Ot teorii k praktike* (Wavelets. From theory to practice), Moscow, SOLON-R, 2002, 448 p. (in Russian).
21. Smolencev N. K. *Osnovy teorii vejvletov. Vejvlety v MATLAB* (Basics of wavelet theory. Wavelets in Matlab), Moscow, DMK Press, 2005, 304 p. (in Russian).
22. Bahvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. M. *Chislennyye metody* (Numerical Methods), Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2004, 636 p. (in Russian).
23. Verzhbickij V. M. *Osnovy chislennyh metodov* (Basics of Numerical Methods), Moscow, Vyssh. shk., 2002. — 840 p. (in Russian).

G. A. Rzevski, проф., e-mail: rzevski@gmail.com, The Open University, Milton Keynes, UK,

J. Knezevic, профессор, MIRCE Academy, Exeter, UK,

П. О. Скобелев, д-р техн. наук, проф., e-mail: petr.skobelev@gmail.com,

Н. М. Боргест, канд. техн. наук, доц., e-mail: borgest@yandex.ru,

Е. В. Симонова, канд. техн. наук, доц., e-mail: simonova.elena.v@gmail.com,

Самарский государственный аэрокосмический университет,

О. И. Лахин, руководитель направления, e-mail: lakhin@smartsolutions-123.ru, НПК "Разумные решения"

Новый подход к управлению жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности с использованием теории сложности*

Описывается новый подход к управлению жизненным циклом изделий (ЖЦИ) аэрокосмической промышленности на основе теории сложности. Предлагается новая система управления жизненным циклом — Сервис управления ЖЦИ, разработанный как адаптивная сеть вычислительных услуг, основанный на мультиагентной технологии с использованием онтологии. Разработана концепция Сервиса управления ЖЦИ как системы, обладающей необходимым уровнем детализации и сложности для управления другой сложной системой. Продемонстрированы преимущества предлагаемого подхода на примере сложных изделий аэрокосмической промышленности. Выделены основные компоненты архитектуры Сервиса управления ЖЦИ и описан механизм их взаимодействия, обосновано решение использовать онтологии для описания концептуальных знаний, необходимых для управления всем жизненным циклом, и мультиагентного подхода для построения сети взаимосвязанных сервисов, каждый из которых отвечает за определенную функцию процесса управления жизненным циклом изделия. Разработана архитектура адаптивного Сервиса управления ЖЦИ аэрокосмической промышленности. Показано, что новое решение задачи управления жизненным циклом с использованием Сервиса управления ЖЦИ обеспечивает согласованное распределенное принятие решения с возможностью его пересмотра в режиме реального времени при возникновении непредвиденных событий, увеличение производительности и надежности, снижение затрат на всех этапах жизненного цикла изделий аэрокосмической промышленности.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия, управление жизненным циклом, Сервис управления жизненным циклом изделия, поддержка принятия решений, адаптивное управление, мультиагентная технология, онтология

Введение

Жизненный цикл (ЖЦ) крупных изделий аэрокосмической промышленности, таких как пассажирские и военные самолеты, ракеты, большие спутники или рой малых спутников, состоит из огромного числа взаимосвязанных процессов, распределяемых обычно по нескольким этапам: проектирование, производство, эксплуатация и утилизация. Мы полагаем, что каждый этап ЖЦ состоит из ряда процессов, описанных ниже.

Этап проектирования включает исследование рынка, составление технического задания, разработку общей концепции изделия, управление проектированием, разработку обобщенной конструкции, включая рабочие характеристики, безопасность, надежность, эксплуатационную пригодность, промышленное производство, сборку, техническое обслуживание, ремонт и утилизацию, а также проектирование (или подбор) комплектующих.

Этап промышленного производства включает выбор и разработку технологий производства, планирование производства и управление им, поставку материалов и комплектующих, изготовление, сборку (на Земле или в космосе), тестирование и обеспечение качества.

Этап эксплуатации включает планирование и управление эксплуатацией изделий аэрокосмической

промышленности и работой экипажа внутри флота воздушных судов; планирование и управление ресурсами для технического обслуживания и ремонта; приобретение, хранение и поставку запасных частей.

Этап вывода из эксплуатации предусматривает безопасную утилизацию и переработку компонентов и/или материалов.

На сегодняшний день принято считать, что каждый этап ЖЦ управляется отдельной командой специалистов, причем взаимодействие между ними весьма ограничено. Как правило, отсутствует центральная команда управления ЖЦ, ответственная за координацию всех процессов — от разработки общей идеи будущего продукта до его утилизации и переработки. Более того, каждый этап ЖЦ обычно поддерживается автономными компьютерными системами, такими как системы автоматизированного проектирования (CAD), системы автоматизированной разработки (CAE), системы автоматизированного производства (CAM), системы планирования ресурсов предприятия (ERP), а также другими производственными и логистическими планировщиками. Подобные системы редко могут быть в полной мере совместимы друг с другом и никогда не объединяются в единую систему управления ЖЦ.

Такое разделение процессов на отдельные этапы ЖЦ и управление каждым этапом с помощью разных систем, поддерживаемых автономными компьютерными программами, ослабляет важные связи между ключевыми процессами ЖЦ и задерживает полезные информационные потоки, в частности,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

обратную связь в виде комментариев и пожеланий от участников производства, сборки, эксплуатации и технической поддержки к проектировщикам. Как следствие, у проектировщиков нет доступа в реальном времени к данным по анализу отказов, которые могли бы им помочь лучше понять взаимосвязь между неисправностями и проектными решениями.

Статистика показателей безопасности в аэрокосмической отрасли ведется отлично. Наша задача — определить те области, в которых стоимость ЖЦ может быть значительно сокращена путем улучшения управления сложностью ЖЦ, и при этом сохранить или даже улучшить существующие уровни безопасности.

1. Проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности с позиций теории сложности

Рассмотрим ЖЦ двух изделия аэрокосмической промышленности: крупного воздушного судна и космической станции.

1.1. Жизненный цикл крупного воздушного судна

В ходе анализа отказов, проведенного в работах [1, 2], были установлены следующие факты:

1. Каждое воздушное судно имеет свой уникальный журнал отказов, который зависит от того, как оно эксплуатировалось и обслуживалось. Условия эксплуатации здесь играют важнейшую роль: самолет, который часто летает в страны Ближнего Востока, будет подвержен отказам из-за наличия песка и высоких температур окружающей среды, в то время как самолет, летающий в северные страны, будет страдать от других видов отказов, возникающих из-за низких температур, снега и льда.

2. Отказы в работе воздушных судов являются взаимозависимыми; выход из строя одного компонента может вызвать сбой других в зависимости, прежде всего, от близкого расположения, а также от функциональных связей. Типичный пример — гидравлическая система, в которой все оперативные и резервные компоненты находятся рядом друг с другом, что иногда приводит к сбою всех компонентов одновременно в результате единственного внешнего события.

3. Моменты возникновения отказов компонентов являются непредсказуемыми, но не случайными, определенные закономерности могут быть обнаружены на основе данных об отказах. Подобные журналы отказов не являются постоянными, они меняются по мере того, как меняются условия эксплуатации воздушного судна, а также в зависимости от срока службы самолета.

Эти выводы ясно показывают, что используемые в настоящее время методы оценки эксплуатационной надежности могут быть значительно улучшены.

Возникают следующие вопросы:

- если каждый отдельно взятый самолет имеет уникальный ЖЦ, правильно ли будет оценивать надежность и организовывать одинаковое обслуживание для всех самолетов с такой же конструкцией?
- если отказы являются взаимозависимыми, правильно ли будет рассчитывать частоту отказов,

игнорируя при этом пространственную взаимозависимость?

- если шаблон отказов изменяется во времени, имеет ли смысл прописывать процедуры технического обслуживания на весь срок службы самолета?

Реализуемые в настоящее время решения проблем, поставленных выше, неэффективны и расточительны, но, тем не менее, приняты из-за высокой сложности ЖЦ крупных изделий аэрокосмической отрасли, так как в настоящее время ни один человек или команда специалистов не способны осмыслить взаимодействия между множествами разнообразных элементов ЖЦ, не говоря уже об управлении ими.

Проиллюстрируем сложность ЖЦ самолета, взяв в качестве примера лайнер B747, один из крупнейших в мире самолетов, который начал выполнять полеты в 1970 г. и был с тех пор продан 170 авиакомпаниям. B747 состоит из 6 млн деталей, из которых 3 млн — это заклепки. Самолет имеет от 5000 до 6000 модулей, играющих важную роль для безопасности, надежности и технического обслуживания. Их необходимо регулярно проверять, тестировать, калибровать, чистить, ремонтировать или менять. Для того чтобы обеспечить безопасность одного летного часа, требуется 12 человеко-часов технического обслуживания (для сравнения: на каждый час полета сверхзвукового самолета Конкорд требовалось 137 человеко-часов).

Следующие данные были взяты из журнала технического обслуживания самого первого самолета Boeing 747 авиакомпании Pan American Airways с бортовым номером N747PA, который начал полеты в 1970 г. Статистика по эксплуатации и основным процедурам технического обслуживания, собранная за 22 года службы этого самолета, приведена ниже:

- потребил более 271 миллионов галлонов топлива;
- налетал 37 млн миль;
- перевез 4 млн пассажиров;
- находился в воздухе 80 000 ч;
- совершил 40 000 взлетов и посадок;
- использовал 2100 шин;
- израсходовал 350 тормозных систем;
- на него было установлено более 125 двигателей;
- на него было потрачено 806 000 человеко-часов технического обслуживания;
- металлическая обшивка на верхней и нижней частях фюзеляжа, а также на крыльях была заменена 5 раз;
- для осмотра конструкции и обнаружения усталости металла и коррозии было использовано 9980 кадров рентгеновских снимков;
- пассажирский салон и туалеты были заменены 4 раза;
- на каждый капитальный ремонт требовалось 50 000 человеко-часов работы.

Самолеты более новых поколений имеют меньшее число деталей, главным образом, за счет использования композитных материалов, и, соответственно, более длительные интервалы основного обслуживания. Так называемые заводские формы технического обслуживания и ремонта (NMV —

Heavy Maintenance Visit) для недавно спроектированных самолетов выполняются каждые 10 лет вместо 5 лет для самолетов, сконструированных в 1970-х годах. Тем не менее, основное техническое обслуживание, по-прежнему, обходится примерно в 1 млн долларов, причем самолет в это время не пригоден к эксплуатации в течение 1...2 месяцев. Наше исследование показывает, что есть значительные возможности для дальнейшего снижения стоимости ЖЦ.

Важно отметить, что сложность ЖУ воздушных судов возрастает со временем.

Ниже перечислены факторы, приводящие к увеличению сложности ЖЦ:

1. Недавнее резкое увеличение сложности мирового рынка, основанного на использовании сети интернет, что делает прогнозирование спроса и предложения воздушного транспорта ненадежным.

2. Жесткая конкуренция между производителями воздушных судов и двигателей требует постоянного внедрения инноваций в целях производства улучшенных топливосберегающих самолетов, способных обеспечить более комфортабельные и эффективные перевозки с точки зрения затрат, и одновременного сокращения времени выполнения заказа (с момента разработки концепции до выхода продукта на рынок).

Более короткие сроки разработки нового продукта оказывают значительное давление на проектировщиков и производителей из-за появляющегося требования к повышению скорости принятия решений. В свою очередь, подобные требования в сочетании с неустойчивостью спроса и предложения являются вескими аргументами для развития более совершенных систем поддержки принятия решений.

1.2. Жизненный цикл Международной космической станции

В качестве типичного примера рассмотрим Международную космическую станцию (МКС), которая, конечно же, много больше, чем любое воздушное судно. МКС по размеру примерно равна футбольному полю. Но при этом герметичное закрытое помещение внутри нее в настоящее время соизмеримо по размеру с самолетом B747. МКС может быть описана как крупный спутник, совершающий оборот вокруг Земного шара по орбите за 90 мин. Ее можно видеть с Земли как четвертый по яркости объект на небе.

Неотъемлемые составные части МКС — это наземные станции, осуществляющие управление и поддержку МКС, а также запускаемые миссии, доставляющие людей и грузы.

ЖЦ МКС отличается от ЖЦ самолета по нескольким аспектам:

- МКС проектируется, производится и собирается в космосе поэтапно, модуль за модулем;
- этап эксплуатации включает в себя доставку астронавтов и грузов и удаление отходов с помощью ракет, которые выполняют стыковку и отстыковку по мере возникновения необходимости, а также обслуживание станции как удаленно с Земли, так и астронавтами в космосе.

Независимо от этих отличий возможные сферы значительных улучшений в управлении ЖЦ одинаковы или сходны с теми, которые были указаны выше для воздушных судов.

1.3. Понятие сложности

Рассмотрим теперь управление ЖЦ крупных изделий аэрокосмической промышленности сквозь призму теории сложных систем [3—7], которая, несмотря на свою новизну, уже достигла достаточно-го уровня зрелости, чтобы предоставить столь необходимую в данном вопросе помощь.

Сложность является свойством открытой системы, которая состоит из большого числа разнообразных, частично автономных, активно взаимодействующих элементов, называемых агентами. Сложная система не имеет централизованного управления, а ее поведение определяется взаимодействием агентов, и поэтому, не будучи хаотичным, является неопределенным, но не случайным.

Данное определение понятия сложности идеально подходит для ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности, в котором тысячи инженеров и управленцев на этапах проектирования и производства, а также десятки тысяч сотрудников службы эксплуатации и поддержки с разными навыками и разной степенью автономности взаимодействуют друг с другом без централизованного управления. Кроме того, в течение ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности необходимо предусмотреть, а затем произвести, поставить, собрать и протестировать миллионы компонентов, характеризующихся различными ЖЦ и подвергающихся различным условиям отказов. Все это разнообразие компонентов эксплуатируется в разных условиях и обслуживается в различных географических точках тысячами инженеров и технологов. Каждый из этих людей обладает определенным уровнем навыков, многие из них относятся к разным культурам. Более того, рабочим языком в регулировании всех задач и процессов выступает английский, который не является родным языком более чем для 80 % населения Земли.

Сложность этапа проектирования, в ходе которого тысячи конструкторов, обладающих сотнями различных навыков, взаимодействуют по проектам с участием структур, состоящих из миллионов компонентов, чрезвычайно высока. В таких условиях очень трудно отследить последние изменения в дизайне и ошибки проектирования, последствия которых могут быть очень серьезными, если их скорейшим образом не выявить и не устранить.

1.4. Новый подход к решению проблемы

Новое решение проблемы управления ЖЦ, которое было разработано авторами и их командами, основано на утверждении, что сложная система может моделироваться и управляться только другой сложной системой [8].

Поэтому новая система управления ЖЦ была разработана как адаптивная сеть вычислительных услуг, основанная на мультиагентных технологиях,

а не на используемых в настоящее время монолитных компьютерных программах. В качестве узлов этой сети выступают элементарные процессы в рамках ЖЦ, которые разрабатываются независимо, один за другим, а затем компонуются в приложения ЖЦ. Каждое приложение является уникальной адаптивной сетью услуг, направленных на достижение функции управления ЖЦ.

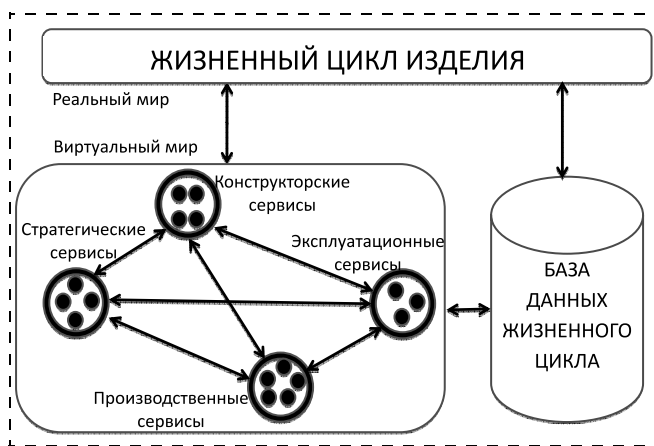
Система или сервис, которые управляют сложной системой, должны иметь необходимый уровень детализации и необходимый уровень сложности [8].

Необходимый уровень детализации для Сервиса управления ЖЦ изделия — это детализация, которая позволяет системе выявлять, хранить и обрабатывать каждый из миллионов составляющих элементов, а также все ресурсы проектирования, производства и эксплуатации. Система такого масштаба не может быть спроектирована в виде единого интегрированного блока. Подход заключается в том, чтобы обнаружить процессы, вполне самодостаточные для того, чтобы сформировать элементарные сервисы, которые могут быть внедрены с использованием мультиагентных технологий, и обеспечить, чтобы эти сервисы, являющиеся роями агентов по существу, сотрудничали и/или конкурировали друг с другом с помощью процесса переговоров [9].

Необходимый уровень сложности для Сервиса управления ЖЦ изделия — это такая сложность, которая позволяет процессам управления адаптироваться к любому изменению в ЖЦ продукта. Это требование противоречит традиционному мнению о том, что сложные системы можно упростить путем разделения их на автономные подсистемы, которые затем могут быть рассмотрены отдельно, одна за другой. Этот подход известен как редукционизм, который хорошо сочетается с методом декомпозиции. Редукционизм, конечно, применим для детерминированных систем и может работать в системах с очень низкой сложностью, но для таких уровней сложности, которые в настоящее время испытывают предприятия, в том числе и в аэрокосмической отрасли, этот подход не адекватен. Вместо упрощения мы должны встраивать сложность в системы управления, для того чтобы соответствовать сложности их физической сущности и соответствующей экономической среды.

Сложность была встроена в Сервис управления ЖЦ изделия путем предоставления частичной автономности агентам за счет возможности переговоров друг с другом о том, как решать каждую стоящую перед ними задачу. При этом агенты должны обращаться к базе знаний о ЖЦ, прежде чем приступать к каким-либо действиям. Кроме того, необходимо обеспечить возможность легко изменять связи между агентами при необходимости. Методы, используемые для разработки сложности в Сервисе управления ЖЦ изделия, подробно описаны в работе [8].

Сервис управления ЖЦ изделия с достаточным уровнем детализации и сложности может быть реализован с использованием мультиагентной технологии, работающей на основе онтологии [10, 11], как это представлено на рисунке.



Архитектура адаптивного Сервиса управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности

В базе данных ЖЦ содержатся все концептуальные знания (онтология) и данные, необходимые для управления всем ЖЦ.

Виртуальный мир состоит из сервисов, которые представлены в виде мультиагентных роев (группировок) в реальном времени, каждый из которых отвечает за определенную функцию процесса управления ЖЦ (стратегическая функция, проектирование, производство, эксплуатация), соответствующую узлам адаптивной сети сервисов. Каждый сервис, в свою очередь, состоит из простейших взаимосвязанных сервисов, предназначенных для общения друг с другом и доступа к базе знаний ЖЦ через сеть ЖЦ. Простейшие сервисы могут располагаться в разных географических локациях.

Существует принципиальная разница между фазой проектирования ЖЦ и остальными фазами (производство, эксплуатация, вывод из эксплуатации). Суть проектирования — в создании изделия и его срока службы, которого еще не существует. В начале фазы проектирования нет ни компонентов, ни конфигурации, ни онтологии. Все, что мы имеем, это неполный набор деталей выбранного изделия (компоненты, конфигурации и онтологии), которые могут быть использованы во время фазы проектирования [12].

Проектные работы можно разделить на две категории:

- 1) создание новых деталей изделия;
- 2) выбор существующих деталей изделия.

В то время как создание новых деталей в настоящее время успешно выполняется инженерами-конструкторами, автоматизация процесса выбора из существующих деталей аэрокосмических изделий может существенно помочь делу.

Не стоит забывать о важности оценок проектирования. Они также могут быть разделены на две категории:

- 1) оценка соответствия проекта требованиям ЖЦ и эстетическим критериям;
- 2) оценка согласованности проекта (в частности, проверка возможности конфликта в ситуации, когда над проектом работает большая группа конструкторов).

В первом случае для оценки проекта необходимы люди, а для выполнения задач второй категории гораздо эффективнее будет использовать мульти-агентное программное обеспечение.

Кроме того, конструкторам необходим быстрый доступ к знаниям об эксплуатации предыдущих спроектированных изделий, для этого нами был разработан расширенный сервис адаптивного поиска конструкторских знаний.

Разработка сервиса управления ЖЦ изделий является эволюционной. База знаний находится в начальном (стандартном) состоянии, а затем она может быть расширена в случае необходимости. Сервисы могут добавляться по одному, позволяя использовать и тестировать систему на практике с самого начала ее разработки и расширять ее при необходимости.

Главными узлами Сервиса управления ЖЦ изделия являются следующие сервисы (см. рисунок):

- *стратегические сервисы:*
 - сервис адаптивного прогнозирования,
 - сервис адаптивного долгосрочного планирования;
- *сервисы проектирования:*
 - сервис адаптивного выбора компонент,
 - сервис адаптивной согласованности проекта,
 - сервис адаптивного обнаружения конструкторских знаний;
- *сервисы управления производством:*
 - сервис адаптивного планирования цепочек поставок,
 - сервис адаптивного планирования производства;
- *сервисы управления эксплуатацией:*
 - сервис адаптивного прогнозирования отказов,
 - сервис адаптивного технического обслуживания и планирования ремонта авиатехники,
 - сервис адаптивного содержания персонала и планирования ремонта,
 - сервисы адаптивного обеспечения авиатехники и планирования ресурсов.

Это неполный список возможных сервисов, но он включает в себя те из них, которые с наибольшей вероятностью увеличат производительность и снизят затраты ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности. Фаза вывода из производства будет рассмотрена на более позднем этапе.

Вышеперечисленные сервисы управления ЖЦ изделия, в свою очередь, состоят из следующих простейших сервисов:

- сервис адаптивного планирования кадровых ресурсов;
- сервис адаптивного планирования материальных ресурсов;
- сервис адаптивного планирования транспортировки;
- сервис адаптивной загрузки;
- сервис адаптивной маршрутизации;
- сервис адаптивного обнаружения знаний;
- сервис адаптивного моделирования;
- сервис адаптивного выбора компонентов;
- сервис адаптивной согласованности проекта.

Простейшие сервисы, перечисленные выше, были тщательно протестированы в различных коммерческих приложениях, большинство из которых находятся в постоянной эксплуатации: планирование доставки грузов на Международную космическую станцию в реальном времени [8], оценка согласованности проектов в реальном времени [8], планирование сетей поставок компании LEGO в реальном времени [13], планирование 2000 машин такси Лондона в реальном времени [14], планирование аренды автомобилей в реальном времени [15], планирование дорожных перевозок в реальном времени [16, 17], планирование производства в реальном времени [18, 19], планирование обслуживающего персонала в реальном времени [20], планирование магистральных железных дорог в реальном времени [21].

Заключение

В основе нового решения существующей задачи управления ЖЦ изделий аэрокосмической промышленности лежат проверенные методы науки о сложности, обеспечивающие весомую экономическую выгоду при использовании в сложных условиях. Предложенное решение дает следующие преимущества [8]:

- все кадровые и материальные ресурсы, а также само предприятие рассматриваются как заинтересованные лица и представлены личными программными агентами. Расписания и прогнозы создаются в ходе переговоров агентов, продолжающихся до тех пор, пока не будет достигнут консенсус. Таким образом, обеспечивается распределенное принятие решения и расширение прав и возможностей заинтересованных сторон;
- на смену автоматическому поиску оптимальных решений, работающему в режиме пакетной обработки и требующему значительного количества времени (обычно от 8 до 10 ч), приходит быстрый обмен сообщениями между агентами, что значительно ускоряет процесс разрешения конфликтов. Соответственно, расписания и прогнозы создаются на порядок быстрее, чем с помощью традиционных оптимизаторов;
- агенты обращаются к базе знаний перед тем, как что-либо предпринимать, а следовательно, сервисы управляются знаниями, а не данными, демонстрируя эмерджентный интеллект. Агенты работают круглосуточно, либо находя новые решения, либо улучшая ранее найденные решения;
- сервисы планирования работают в режиме реального времени, следовательно, каждый из них при возникновении непредвиденных событий способен перепланировать размещение ресурсов с минимальными изменениями в ранее составленных расписаниях (например, при появлении непредвиденного требования или отсутствии ожидаемого требования). Таким образом, система управления ЖЦ адаптируется к изменениям ЖЦ, которым она управляет;

- сервисы прогнозирования (например, прогнозирование потребности или прогнозирование отказов) являются динамическими, поэтому при появлении непредвиденных событий, нарушающих ранее данный прогноз, они способны адаптировать прогнозы в режиме реального времени;
- все программные сервисы: а) способны взаимодействовать друг с другом, б) имеют доступ к базе знаний, в) выводят результаты на общий сервисный интерфейс;
- заказчики вносят небольшую плату за индивидуальную настройку и подписываются на любые услуги по выбору за ежемесячную оплату. Здесь нет никаких капиталовложений;
- разработка и реализация программных сервисов являются эволюционными. Начав с одного сервиса, заказчики могут добавлять новые сервисы при необходимости.

В дальнейшем для достижения наибольшего эффекта улучшения управления ЖЦ изделий мы решили сосредоточиться на разработке и реализации адаптивного сервиса хранения и планирования запасных частей, что дает возможность повысить надежность выполнения запланированных полетов и одновременно снизить время и затраты на техническое обслуживание.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

Список литературы

1. **Knezevic J.** Reliability, Maintainability and Supportability: A probabilistic Approach. McGraw-Hill, 1993.
2. **Knezevic J.** Systems Maintainability: Analysis, Engineering and Management. Springer, 1997.
3. **Prigogine I.** The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature. Free Press, 1997.
4. **Prigogine I.** Is Future Given? World Scientific Publishing Co., 2003.
5. **Kaufman S.** At Home In the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity. Oxford Press, 1995.
6. **Holland J. H.** Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Addison Wesley, 1995.
7. **Holland J.** Emergence: from Chaos to Order. Oxford University Press, 1998. 258 p.

8. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity, WIT Press, 2014.
9. **Rzevski G.** Self-organization in social systems // *Онтология проектирования*. 2014. № 4 (14). С. 8–17.
10. **Виттих В. А., Моисеева Т. В., Скобелев П. О.** Принятие решений на основе консенсуса с применением мультиагентных технологий // *Онтология проектирования*. 2013. № 2 (8). С. 20–25.
11. **Скобелев П. О.** Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // *Онтология проектирования*. 2013. № 2 (8). С. 26–48.
12. **Боргест Н. М.** Научный базис онтологии проектирования // *Онтология проектирования*. 2013. № 1 (7). С. 7–25.
13. **Madsen B., Skobelev P., Rzevski G., Tsarev A.** Real-Time Multi-agent Forecasting and Replenishment Solution for LEGO Branded Retail Outlets // *International Journal of Software Innovation*. IGI Global. 2013. V. 1, Iss. 2. P. 28–39.
14. **Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P.** Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies // *Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009)*, Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.), May, 10–15, 2009, Budapest, Hungary. P. 29–35.
15. **Andreev S., Rzevski G., Shveykin P., Skobelev P., Yankov I.** Multi-Agent Scheduler for Rent-A-Car Companies // *Proc. of the Forth Int. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2009*, Linz, Austria. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2009. V. 5696. P. 305–314.
16. **Himoff J., Rzevski G., Skobelev P.** Magenta Technology: Multi-Agent Logistics i-Scheduler for Road Transportation // *Proc. of the Fifth Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Hakodate, Japan, 2006*. P. 1541–1521.
17. **Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A.** Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system // *Proc. of the 5th Int. Conf. on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013)*, February 15–18, 2013, Barcelona, Spain. SciTePress, 2013. V. 2. P. 244–249.
18. **Tyrin I., Vylegzhanin A., Kolbova E., Kuznetsov O., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya.** Multi-Agent System "Smart Factory" for Realtime Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory // *Proc. of the 2012 IEEE 17th Int. Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, September 17–22, 2012, Krakow, Poland. 4 p. DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489694.
19. **Shpilevoy V., Shishov A., Skobelev P., Kolbova E., Kazanskaya D., Shepilov Ya., Tsarev A.** Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production // *Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13)*, May 22–24, 2013, Sao Paulo, Brazil, 2013. P. 204–209.
20. **Блинов С. В., Сердюк В. Е., Онищенко Г. В., Скобелев П. О., Ларюхин В. Б., Очков Д. С., Царев А. В., Томин В. А.** Мультиагентная система управления мобильными бригадами для Средневолжской газовой компании // *Тр. XIV Междунар. конф. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах"*, Самара, 22–25 июня 2012 г. Самара: СНЦРАН, 2012. С. 741–745.
21. **Шабунин А. Б., Кузнецов Н. А., Скобелев П. О., Бабанин И. О., Кожевников С. С., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В.** Разработка мультиагентной системы адаптивного управления ресурсами ОАО "РЖД" // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 1. С. 23–29.

A New Approach to Managing Life Cycle of Aerospace Products using Complexity Theory

G. A. Rzevski, rzevski@gmail.com, Open University, MK7 6AA, United Kingdom, Buckinghamshire, Milton Keynes, Walton Hall, **J. Knezevic**, MIRCE Academy, Exeter, UK
P. O. Skobelev, petr.skobelev@gmail.com, **N. M. Borgest**, borgest@yandex.ru,
E. V. Simonova, simonova.elena.v@gmail.com, Samara State Aerospace University,
 443086, Samara, Russian Federation, **O. I. Lakhin**, lakhin@yandex.ru,
 "SEC "Smart Solutions" Ltd., 44301 Samara, Russian Federation

Corresponding author: Skobelev Petr O., Dr. Sc. Tech., Senior Researcher at the Institute of Complex Systems Control of the Russian Academy of Sciences, Professor at Department for aircraft construction and engineering of Samara State Aerospace University, Head of Department for electronic systems of information security of Samara State Technical University. Work address: office center "Vertikal" 12th floor, 17 Moskovskoe shosse, Samara 44301, Russian Federation, Tel./Fax: + 7 (846) 279-37-79, e-mail: petr.skobelev@gmail.com

*Received on January 28, 2015
 Accepted on February 16, 2015*

Problem statement: The lifecycle of a large aerospace product consists of a very large number of interconnected activities, which are normally partitioned into several phases such as Design, Production, Operation and Decommissioning. Today, there is no central lifecycle management system. A new approach to the aerospace product lifecycle management based on concepts and principles of Complexity Science is described in this paper. **Methods:** A new lifecycle management system is suggested — Product Lifecycle Management (PLM) Service has been designed as an adaptive network of computational services based on multi-agent technology with ontology. **Results:** A concept of PLM system that have a requisite granularity and requisite complexity in order to manage other complex system. **Advantages of the suggested approach** are shown based on the complex aerospace products example. Basic components of PLM Service architecture are specified and their interaction mechanism is described. A decision to use ontologies for conceptual knowledge description, required to manage the whole lifecycle and multi-agent approach for interconnected services network design where each server is dedicated to a particular lifecycle management function is justified. An architecture of an adaptive Aerospace PLM Service is developed. Developed models and methods of decision-making support in different system components allow to provide an appropriate reaction to the disruptive events on all aerospace products lifecycle phases. **Practical value:** The new solution to the existing problem of aerospace products lifecycle management with PLM Service provides distributed decision-making capable of revising the decision in real time whenever a disruptive event occurs, productivity improvement and costs reduction of aerospace product lifecycles.

Keywords: product lifecycle, lifecycle management, PLM Service, decision-making support, adaptive management, multi-agent technologies, ontology

Acknowledgements: The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

For citation:

Rzevski G. A., Knezevic J., Skobelev P. O., Borgest N. M., Simonova E. V., Lakhin O. I. A New Approach to Managing Life Cycle of Aerospace Products using Complexity Theory, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 282—288.

DOI: 10.17587/mau/17.282-288

References

1. Knezevic J. Reliability, Maintainability and Supportability: A probabilistic Approach, McGraw-Hill, 1993.
2. Knezevic J. Systems Maintainability: Analysis, Engineering and Management, Springer, 1997.
3. Prigogine I. The End of Certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature, Free Press, 1997.
4. Prigogine I. Is Future Given? World Scientific Publishing Co., 2003.
5. Kaufman S. At Home In the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford Press, 1995.
6. Holland J. H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity, Addison Wesley, 1995.
7. Holland J. Emergence: from Chaos to Order, Oxford University Press, 1998, 258 p.
8. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity, WIT Press, 2014.
9. Rzevski G. Self-organization in social systems, *Ontology of Designing*, 2014, no. 4 (14), pp. 8—17 (in Russian).
10. Vittikh V. A., Moiseeva T. V., Skobelev P. O. *Prinyatie reshenii na osnove konsensusa s primeneniem mul'tiagentnykh tekhnologii* (Decision making on the basis of consensus using multi-agent technologies), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 2 (8), pp. 20—25 (in Russian).
11. Skobelev P. O. *Situatsionnoe upravlenie i mul'tiagentnye tekhnologii: kollektivnyi poisk soglasovannykh reshenii v dialoge* (Situatuin-driven decision making and multi-agent technology: finding solutions in dialogue), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 2 (8), pp. 26—48 (in Russian).
12. Borgest N. M. *Nauchnyi bazis ontologii proektirovaniya* (Scientific basis for the ontology of designing), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 1 (7), pp. 7—25 (in Russian).
13. Madsen B., Skobelev P., Rzevski G., Tsarev A. Real-Time Multi-agent Forecasting and Replenishment Solution for LEGO Branded Retail Outlets, *International Journal of Software Innovation*, IGI Global, 2013, vol. 1, iss. 2, pp. 28—39.
14. Glaschenko A., Ivaschenko A., Rzevski G., Skobelev P. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies, *Proc. of 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009)*, Decker, Sichman, Sierra, and Castelfranchi (eds.), May, 10—15, 2009, Budapest, Hungary, pp. 29—35.
15. Andreev S., Rzevski G., Shveykin P., Skobelev P., Yankov I. Multi-Agent Scheduler for Rent-A-Car Companies, *Proc. of the Forth Int. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2009*, Linz, Austria, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2009, vol. 5696, pp. 305—314.
16. Himoff J., Rzevski G., Skobelev P. Magenta Technology: Multi-Agent Logistics i-Scheduler for Road Transportation, *Proc. of the Fifth Int. Joint Conf on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Hakodate, Japan, 2006, pp. 1541—1521.
17. Granichin O., Skobelev P., Lada A., Mayorov I., Tsarev A. Cargo transportation models analysis using multi-agent adaptive real-time truck scheduling system, *Proc. of the 5th Int. Conf. on Agents and Artificial Intelligence (ICAART'2013)*, February 15—18, 2013, Barcelona, Spain, SciTePress, 2013, vol. 2, pp. 244—249.
18. Tyrin I., Vylegzhanin A., Kolbova E., Kuznetsov O., Skobelev P., Tsarev A., Shepilov Ya. Multi-Agent System "Smart Factory" for Real-time Workshop Management: Results of Design & Implementation for Izhevsk Axion-Holding Factory, *Proc. of the 2012 IEEE 17th Int. Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, September 17—22, 2012, Krakow, Poland, 4 p. DOI: 10.1109/ETFA.2012.6489694.
19. Shpilevoy V., Shishov A., Skobelev P., Kolbova E., Kazanskaya D., Shepilov Ya., Tsarev A. Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production, *Proc. of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13)*, May 22—24, 2013, Sao Paulo, Brazil, 2013, pp. 204—209.
20. Blinov S. V., Serdjuk V. E., Onishhenko G. V., Skobelev P. O., Larjuhin V. B., Ochkov D. S., Carev A. V., Tomin V. A. *Mul'tiagentnaya sistema upravleniya mobil'nymi brigadami dlya Srednevolzhskoy gazovoy kompanii* (Multi-Agent System for Managing Mobile Teams for Samara Region Gas Distributor), *Proc. of XIV Int. Conf. on Complex Systems*, June 22—25, 2013, Samara, Russia, pp. 741—745 (in Russian).
21. Shabunin A. B., Kuznecov N. A., Skobelev P. O., Babanin I. O., Kozhevnikov S. S., Simonova E. V., Stepanov M. E., Carev A. V. *Razrabotka mul'tiagentnoj sistemy adaptivnogo upravleniya resursami OAO "RZhD"* (Multi-agent system for railways resource management), *Mechatronics, Automation, Control*, 2013, no. 1, pp. 23—29 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 26.01.2016. Подписано в печать 15.03.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН416. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солишнз". Отпечатано в ООО "Авансд солишнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.