

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 23

2022

№ 6

Издаётся с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Бобцов А. А., Николаев Н. А., Ортега Р., Слита О. В., Козачёк О. А. Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейной нестационарной системы с частично неизвестными параметрами матрицы состояния и вектора входа283

Жирабок А. Н., Ким Чхун Ир, Бобко Е. Ю. Сравнительный анализ канонических форм в задачах диагностирования и оценивания289

Быковцев Ю. А. Синтез нечеткого регулятора на основе оценки степени устойчивости системы управления295

Суятинов С. И., Булдакова Т. И., Вишневская Ю. А. Синергетическая модель ситуационной осведомленности человека-оператора в эргатических системах управления подвижными объектами302

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Сочнев А. Н. Оптимизационно-имитационный подход к оперативному управлению дискретным производством309

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Девятисильный А. С., Шурыгин А. В. Математические модели и алгоритмы бортовой мультиагентной интегрированной системы определения движения317

Агеев А. М., Буков В. Н., Шурман В. А. Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Часть 2. Парный арбитраж вычислителей327

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 23

2022

No. 6

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

MAGOMEDOV M. Kh.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEYEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and perspectives 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

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

Bobtsov A. A., Nikolaev N. A., Ortega R., Slita O. V., Kozachek O. A. Adaptive State Observer for Linear Time-Varying System with Partially Unknown State Matrix and Input Matrix Parameters 283

Zhirabok A. N., Kim C., Bobko E. Yu. Comparative Analysis of Canonical Forms in Fault Diagnosis and Estimation Problems 289

Bykovtsev Y. A. Synthesis of a Fuzzy Controller According to the Degree of Stability of the Control System 295

Suyatinov S. I., Buldakova T. I., Vishnevskaya Yu. A. Synergetic Model of Situational Awareness of a Human Operator in Ergatic Control Systems of Mobile Objects 302

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Sochnev A. N. Simulation Petri Net Model in the Tasks of Operational Control of Discrete Production 309

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Devyatisilny A. S., Shurygin A. V. Mathematical Models and Algorithms of the Onboard Multi-Agent Integrated Motion Determination System 317

Ageev A. M., Bukov V. N., Shurman V. A. Algorithms for Managing the Redundancy of Onboard Equipment Complexes of Mobile Objects. Part 2. Paired Arbitration of Computers 327

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

А. А. Бобцов¹, д-р техн. наук, проф., bobtsov@mail.ru,
Н. А. Николаев¹, канд. техн. наук, доц., nikona@yandex.ru,
Р. Ортега², д-р техн. наук, проф., romeo.ortega@itam.mx,

О. В. Слита¹, канд. техн. наук, доц., o-slita@yandex.ru, О. А. Козачёк¹, аспирант, oakozachek@mail.ru,

¹ Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,

² Instituto Tecnológico Autónomo de México, México

Адаптивный наблюдатель переменных состояния линейной нестационарной системы с частично неизвестными параметрами матрицы состояния и вектора входа*

Рассматривается проблема синтеза адаптивного наблюдателя переменных состояния линейной нестационарной одно-канальной динамической системы. Предполагается, что сигнал управления и выходная переменная измеряемы. При этом допускается, что матрица состояния объекта управления содержит известные переменные и неизвестные постоянные параметры, а матрица (вектор) управления неизвестна. Синтез наблюдателя основан на методе GPEBO (обобщенный наблюдатель, основанный на оценке параметров), предложенном в работе [1]. Синтез адаптивного наблюдателя предусматривает предварительную параметризацию исходной системы и преобразование ее к линейной регрессионной модели с дальнейшей идентификацией неизвестных параметров. Для идентификации неизвестных постоянных параметров был использован классический алгоритм оценки — метод наименьших квадратов с фактором забывания (forgetting factor). Данный подход хорошо себя зарекомендовал в случаях, когда известный регрессор является "частотно бедным" (т. е. спектральный состав регрессора содержит менее $r/2$ гармоник, где r — число неизвестных параметров) или не удовлетворяет так называемому условию незатухающего возбуждения. Для иллюстрации работоспособности предложенного метода в статье представлен пример, в котором рассмотрен нестационарный объект второго порядка с четырьмя неизвестными параметрами. Была проведена параметризация исходной динамической модели и получена линейная статическая регрессия, содержащая шесть неизвестных параметров (включая вектор неизвестных начальных условий переменных состояния системы). Синтезирован адаптивный наблюдатель и представлены результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие достижение заданной цели. Основным отличием от результатов, опубликованных ранее в работе [2], является новое допущение о том, что не только линейная нестационарная система содержит неизвестные параметры в матрице состояния, но и матрица (вектор) по управлению содержит неизвестные постоянные коэффициенты.

Ключевые слова: адаптивный наблюдатель, линейная нестационарная система, линейная регрессионная модель

Введение

В задачах управления сложными динамическими системами получение информации о состоянии системы осуществляется с помощью первичных измерительных преобразователей (датчиков). При этом не всегда удастся разместить набор измерительных средств, который позволит измерить весь вектор состояния объекта, поэтому для оценки недоступных прямым измерениям переменных состояния используются наблюдатели. Для случаев, когда объект описывается линейной динамической системой с постоянными параметрами, в настоящее время разработаны эффективные методы синтеза

наблюдателей. Стоит отметить, что не всегда возможно достаточно точно описать поведение объекта с помощью моделей с постоянными параметрами в связи с тем, что параметры могут изменяться с течением времени. Это обусловлено различными как внутренними, так и внешними факторами, такими, например, как старение и соответствующее ухудшение параметров элементов системы, воздействие температуры, изменение массогабаритных параметров в процессе функционирования. С примерами использования линейных нестационарных систем применительно к задачам механики можно ознакомиться, например, в работе [3]. Более точно поведение сложной динамической системы может быть описано с помощью дифференциальных уравнений с нестационарными параметрами, поэтому в настоящее время большую актуальность имеют

*Исследование выполнено за счет гранта Российского национального фонда № 22-21-00499, <https://rscf.ru/project/22-21-00499/>.

исследования, направленные на синтез наблюдателей для нестационарных систем.

Проблема синтеза наблюдателей для линейных нестационарных систем не является новой, однако интерес исследователей к данной проблеме не угасает. Так, например, в статье [4] рассматривается задача синтеза оптимальных эллипсоидных наблюдателей и алгоритмов идентификации, обеспечивающих наилучшие эллипсоидные оценки состояния системы и неизвестных параметров. Задачи построения наблюдателей решаются использованием различных подходов, одним из которых является сведение исходной математической модели к линейной регрессионной (см., например, работы [2, 5]) с последующей идентификацией ее параметров.

Проблема оценки вектора состояния линейной нестационарной системы является актуальной при синтезе управления, но также имеет самостоятельное значение. Например, информация, получаемая с наблюдателя, может использоваться для построения устройств контроля технического состояния объекта [6–8].

В задачах оценивания вектора состояния линейных нестационарных систем с частично неизвестными параметрами обычно рассматриваются динамические системы с различными допущениями относительно матриц с нестационарными параметрами вида

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{W}(t)\boldsymbol{\theta}; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ — векторы состояния, управления и выхода соответствующей размерности (при этом в различных постановках рассматриваются как системы с одним входом и одним выходом (SISO), как, например, в работах [9, 10], так и многомерные системы (MIMO), как, например, в статье [11]); $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{C}^T(t)$ — известные матрицы с нестационарными коэффициентами соответствующей размерности; $\boldsymbol{\theta}$ — вектор неизвестных параметров; $\mathbf{W}(t)$ — матрица известных сигналов соответствующей размерности.

В качестве цели ставится задача оценки вектора состояния и вектора неизвестных параметров по измерениям $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ и $\mathbf{W}(t)$.

При отсутствии вектора неизвестных параметров $\boldsymbol{\theta}$ задача сводится к классической проблеме оценки вектора состояния [12], для которой алгоритм оценки ищется в виде

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{y}(t) + \mathbf{H}(t)\mathbf{u}(t),$$

где $\mathbf{F}(t)$, $\mathbf{G}(t)$, $\mathbf{H}(t)$ — соответствующие матрицы.

В настоящее время проблемам синтеза наблюдателей для неизвестного вектора состояния нестационарной системы посвящено достаточно большое число работ, при этом вводятся различные предположения и допущения относительно матриц описания объекта. Так, например, в работе [13] задача синтеза наблюдателя решается в предположении, что матрица объекта $\mathbf{A}(t)$ представлена в канонической форме. В данной работе предлагается развитие подхода, предложенного ранее в работе [2], где рассматривалась линейная нестационарная система с частично неизвестными параметрами. В отличие от полученного в ней результата в данной работе выполнено расширение на случай, когда матрица (вектор) управления содержит неизвестные постоянные параметры.

Постановка задачи

Рассматривается линейная нестационарная система с одним входом и одним выходом (SISO) вида

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{k}\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t), \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n, t \geq 0, \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t),\end{aligned}\quad (2)$$

где $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ — неизмеряемый вектор состояния; $u(t) \in \mathbb{R}$ — известный входной сигнал; $y(t)$ — измеряемый выходной сигнал; матрицы $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{C}^T(t)$ являются известными матрицами с нестационарными параметрами; $\mathbf{k}$ и $\mathbf{b}$ — векторы соответствующей размерности. Предполагается, что $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{C}(t)$ известны и ограничены, а векторы $\mathbf{k} \in \mathbb{R}^n$ и $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ постоянны и неизвестны.

На основе этих данных в статье разработан адаптивный наблюдатель:

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\chi}}(t) &= \mathbf{F}(\boldsymbol{\chi}(t), u(t), y(t)); \\ \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \hat{\mathbf{k}}(t) \\ \hat{\mathbf{b}}(t) \end{bmatrix} &= \mathbf{S}(\boldsymbol{\chi}(t), u(t), y(t)),\end{aligned}$$

где $\boldsymbol{\chi}(t) \in \mathbb{R}^{n_\chi}$ такой, что все сигналы ограничены, а также обеспечивается сходимость оценок переменных состояния и неизвестных постоянных параметров к их реальным значениям:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t), \hat{\mathbf{k}}(t) = \mathbf{k}, \hat{\mathbf{b}}(t) = \mathbf{b},$$

для всех $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n$, $\boldsymbol{\chi}(t) \in \mathbb{R}^{n_\chi}$.

В соответствии со стандартным подходом в теории наблюдателей траектории входа и состояния полагаются ограниченными.

Рассмотрим типовые предположения, которые накладываются на матрицы исходной системы (см., например, [14–16]).

Предположение 1. Пара матриц $\mathbf{A}(t)$ и $\mathbf{C}^T(t)$ является обнаруживаемой, т. е. существует матрица обратной связи $\mathbf{L}(t)$ такая, что система

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{A}(t) - \mathbf{L}(t)\mathbf{C}^T(t)]\mathbf{x}(t),$$

является асимптотически устойчивой.

Предположение 2. Фундаментальная матрица автономной системы $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_0(t)\mathbf{x}(t)$, где $\mathbf{A}_0(t) = \mathbf{A}(t) - \mathbf{L}(t)\mathbf{C}^T(t)$, удовлетворяет условию

$$\|\Phi_{\mathbf{A}_0}(t, \tau)\| \leq c_1, \forall t \geq \tau \geq 0,$$

что означает равномерную устойчивость автономной системы (uniformly stable), см. Теорему 6.4 [16].

Предположение 3. Выполняется условие вида

$$\int_{\tau}^t \|\Phi_{\mathbf{A}_0}(t, \tau)\mathbf{B}(s)\| ds \leq c_2, \forall t \geq \tau \geq 0,$$

являющееся необходимым и достаточным условием устойчивости типа ограниченный вход—ограниченное состояние (BIBS — bounded-input-bounded-state) системы (1) с добавлением составляющей $-\mathbf{L}(t)\mathbf{C}^T(t)$ и при $\mathbf{k} = 0$.

Основной результат

В данной работе на первом шаге решается задача параметризации, т. е. сведение задачи оценки параметров для исходной динамической модели к идентификации параметров для линейной статической регрессионной модели. Вторым шагом выполняется оценка неизвестных постоянных параметров линейной регрессионной модели, которая, как известно, может решаться различными методами в зависимости от того, какие условия возбуждения накладываются на регрессор (см., например, [5, 17, 18]).

Теорема 1. Рассмотрим динамическую систему вида

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{A}_0(t)\xi(t) + \mathbf{L}(t)y(t), \xi(0) = \mathbf{0}_{n \times 1}, \quad (3)$$

$$\dot{\eta}(t) = \mathbf{A}_0(t)\eta(t) + \mathbf{I}y(t), \eta(0) = \mathbf{0}_{n \times n}, \quad (4)$$

$$\dot{\zeta}(t) = \mathbf{A}_0(t)\zeta(t) + \mathbf{I}u(t), \zeta(0) = \mathbf{0}_{n \times n}, \quad (5)$$

$$\dot{\Phi}(t) = \mathbf{A}_0(t)\Phi(t), \Phi(0) = \mathbf{I}_{n \times n},$$

где $\mathbf{A}_0(t)$ и $\mathbf{L}(t)$ удовлетворяют допущениям 1–3.

Тогда исходная динамическая система (2) может быть преобразована к линейной регрессионной модели вида

$$z(t) = \Psi(t)\Theta, \quad (6)$$

где функция $z(t) = y(t) - \mathbf{C}^T(t)\xi(t)$ является известной, вектор известных функций $\Psi(t) = [-\mathbf{C}^T(t)\Phi(t) \quad \mathbf{C}^T(t)\eta(t) \quad \mathbf{C}^T(t)\zeta(t)]$ и $\Theta = [\theta \quad \mathbf{k} \quad \mathbf{b}]^T$ — вектор неизвестных параметров.

Доказательство.

Рассмотрим уравнение ошибки вида

$$\mathbf{e}(t) = \xi(t) + \eta(t)\mathbf{k} + \zeta(t)\mathbf{b} - \mathbf{x}(t), \quad (7)$$

тогда для производной от ошибки имеем

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \dot{\xi}(t) + \dot{\eta}(t)\mathbf{k} + \dot{\zeta}(t)\mathbf{b} - \dot{\mathbf{x}}(t) = \\ &= \mathbf{A}_0(t)\xi(t) + \mathbf{L}(t)y(t) + \mathbf{A}_0(t)\eta(t)\mathbf{k} + \\ &+ \mathbf{I}y(t)\mathbf{k} + \mathbf{A}_0(t)\zeta(t)\mathbf{b} + \mathbf{I}u(t)\mathbf{b} - (\mathbf{A}_0(t) + \\ &+ \mathbf{L}(t)\mathbf{C}^T(t))\mathbf{x}(t) - \mathbf{k}\mathbf{C}^T(t)\mathbf{x}(t) - \mathbf{b}u(t) = \\ &= \mathbf{A}_0(t)\xi(t) + \mathbf{A}_0(t)\eta(t)\mathbf{k} + \mathbf{A}_0(t)\zeta(t)\mathbf{b} - \\ &- \mathbf{A}_0(t)\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_0\mathbf{e}(t); \\ \dot{\mathbf{e}}(t) &= \mathbf{A}_0\mathbf{e}(t). \end{aligned}$$

Решение дифференциального уравнения $\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{A}_0\mathbf{e}(t)$ имеет вид

$$\mathbf{e}(t) = \Phi(t)\theta, \quad (8)$$

где $\theta = \mathbf{e}(0)$ и в случае, если начальные условия для динамической системы (3)–(5) выбраны нулевыми, то $\mathbf{e}(0) = -\mathbf{x}(0)$.

Далее, после подстановки (8) в уравнение (7) имеем

$$\mathbf{x}(t) - \xi(t) = \eta(t)\mathbf{k} + \zeta(t)\mathbf{b} - \Phi(t)\theta. \quad (9)$$

Домножив слева левую и правую части выражения (9) на $\mathbf{C}^T(t)$, получаем линейную регрессионную модель вида (6).

Если выполняется условие неистощающего возбуждения

$$\alpha_2 \mathbf{I} \leq \int_{t_0}^{t_0+\delta} \Psi(\tau)\Psi^T(\tau)d\tau \leq \alpha_1 \mathbf{I} \text{ для всех } t_0 > 0,$$

где α_1, α_2 и δ — положительные константы, то для нахождения неизвестных параметров линейной регрессионной модели можно использовать различные подходы, в том числе градиентный алгоритм идентификации [19], метод динамического расширения регрессора и смешивания [17, 18] и др.

В данной работе для оценки параметров линейной регрессионной модели предлагает-

ся использовать классический алгоритм оценки — метод наименьших квадратов с фактором забывания (forgetting factor) [20, 21] вида

$$\hat{\Theta} = \gamma \mathbf{F}(t) \Psi^T(t) (z(t) - \Psi(t) \hat{\Theta}),$$

$$\dot{\mathbf{F}} = \begin{cases} -\gamma \mathbf{F}(t) \Psi^T(t) \Psi(t) \mathbf{F}(t) + \beta \mathbf{F}(t), & \text{если } \|\mathbf{F}(t)\| \leq M \\ \mathbf{0} & \text{если } \|\mathbf{F}(t)\| > M \end{cases},$$

где $\mathbf{F}(0) = \frac{1}{f_0} \mathbf{I}$, где $\mathbf{I}$ — единичная матрица соответствующей размерности, настраиваемые параметры $\gamma > 0$, $\beta > 0$, $f_0 \geq 0$, $M > 0$.

Таким образом, оценку вектора состояния динамической системы (2) можно получить из соотношения (9) в виде

$$\hat{x}(t) = \xi(t) - \Phi(t) \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \end{bmatrix} + \eta(t) \begin{bmatrix} \Theta_3 \\ \Theta_4 \end{bmatrix} + \zeta(t) \begin{bmatrix} \Theta_5 \\ \Theta_6 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования

Моделирование проводилось при следующих параметрах системы (2):

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 1,8 + \sin(0,5t) & -1 \\ 5,2 + \cos(2t) + 0,5 \sin t & -4 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}; \mathbf{k} = \begin{bmatrix} -1 \\ -3 \end{bmatrix}; \mathbf{C}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

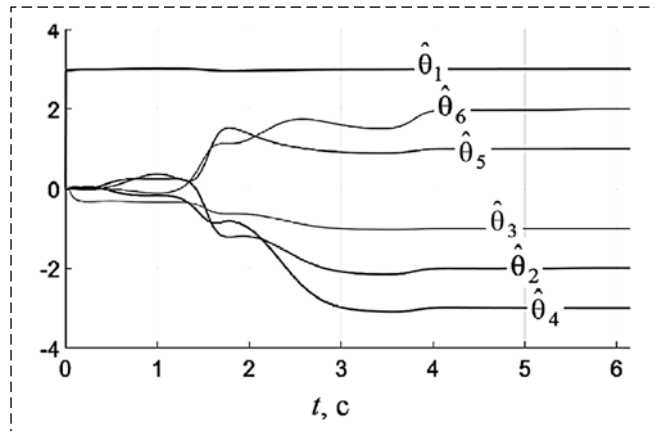


Рис. 1. Переходные процессы по оценки неизвестных параметров
Fig. 1. Transient processes of estimation of unknown parameters

Используя вектор $\mathbf{L}(t) = \begin{bmatrix} 0,8 + 0,5 \sin(0,5t) \\ 0,2 + \cos(2t) \end{bmatrix}$, имеем

$$\mathbf{A}_0(t) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 5 + 0,5 \sin t & -4 \end{bmatrix}.$$

Моделирование проводилось при начальных условиях $\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} 3 \\ -2 \end{bmatrix}$. Параметры алгоритма оценки были выбраны следующим образом: $\alpha = 1000$, $M = 10^{12}$, $\beta = 1$, $f_0 = 0,1$, $u(t) = \sin(t)$.

На рис. 1 приведены переходные процессы оценки неизвестных параметров $\hat{\Theta} = [\hat{\mathbf{e}}(0) \hat{\mathbf{k}} \hat{\mathbf{b}}]^T$.

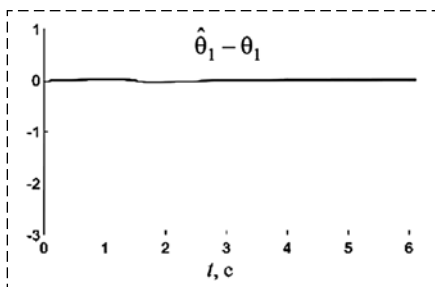


Рис. 2. Переходный процесс по ошибке $\hat{\theta}_1 - \theta_1$
Fig. 2. Transient process of error $\hat{\theta}_1 - \theta_1$

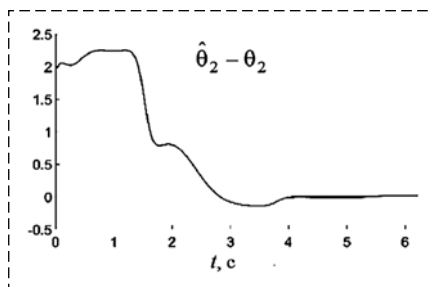


Рис. 3. Переходный процесс по ошибке $\hat{\theta}_2 - \theta_2$
Fig. 3. Transient process of error $\hat{\theta}_2 - \theta_2$

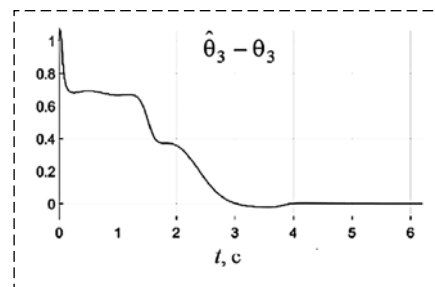


Рис. 4. Переходные процесс по ошибке $\hat{\theta}_3 - \theta_3$
Fig. 4. Transient process of error $\hat{\theta}_3 - \theta_3$

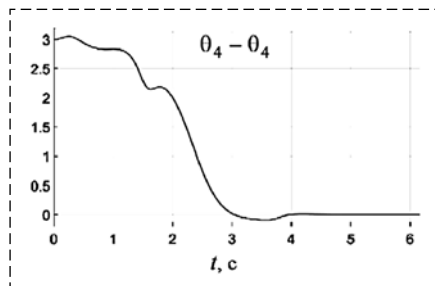


Рис. 5. Переходный процесс по ошибке $\hat{\theta}_4 - \theta_4$
Fig. 5. Transient process of error $\hat{\theta}_4 - \theta_4$

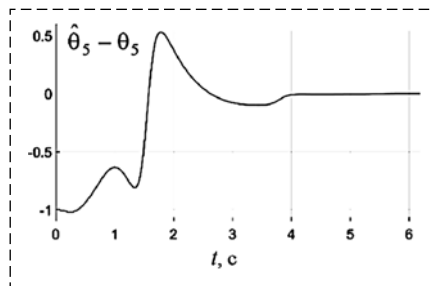


Рис. 6. Переходной процесс по ошибке $\hat{\theta}_5 - \theta_5$
Fig. 6. Transient process of error $\hat{\theta}_5 - \theta_5$

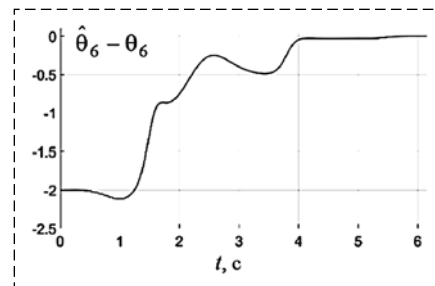


Рис. 7. Переходной процесс по ошибке $\hat{\theta}_6 - \theta_6$
Fig. 7. Transient process of error $\hat{\theta}_6 - \theta_6$

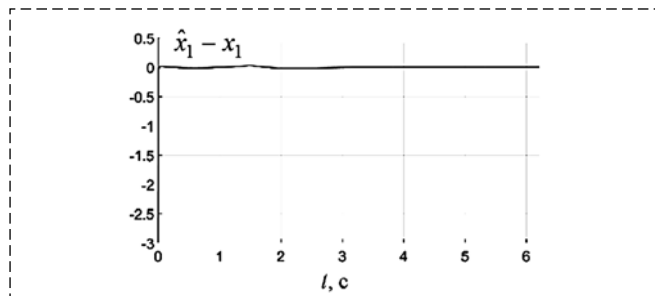


Рис. 8. Переходной процесс по ошибке $\hat{x}_1 - x_1$
Fig. 8. Transient process of error $\hat{x}_1 - x_1$

На рис. 2—7 приведены результаты моделирования ошибок оценивания неизвестных параметров $\hat{\Theta}_i - \Theta_i$, где $i = \overline{1,6}$. На рис. 8 и 9 приведены переходные процессы по ошибке оценки переменных состояния нестационарной системы $\hat{x}_i - x_i$, где $i = \overline{1,2}$.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 1—9, иллюстрируют работоспособность предложенного в работе алгоритма идентификации переменных состояния линейной нестационарной системы (2) с частично неизвестными параметрами и неизвестной постоянной матрицей управления.

Заключение

В статье предложен адаптивный наблюдатель состояния линейной нестационарной системы с частично неизвестными постоянными параметрами. Задача решена в предположении, что измеряется только выходная переменная, и матрицы состояния и управления содержат неизвестные постоянные значения. Результаты математического моделирования иллюстрируют работоспособность предложенного алгоритма.

Список литературы

1. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical—biological reactors // *Automatica*. 2021. Vol. 129. P. 109635.
2. Bobtsov A., Ortega R., Yi B., Nikolaev N. Adaptive state estimation of state-affine systems with unknown time-varying parameters // *International Journal of Control*. 2021. P. 1—13.
3. Каленова В. И., Морозов В. М. Линейные нестационарные системы и их приложения к задачам механики / Учеб. пособ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 208 с.
4. Баландин Д. В., Коган М. М. Управление и оценивание в линейных нестационарных системах на основе эллипсоидальных множеств достижимости // *Автоматика и телемеханика*. 2020. № 8. С. 8—28.
5. Glushchenko A., Lastochkin K. Robust Time-Varying Parameters Estimation Based on I-DREM Procedure // *arXiv preprint arXiv:2111.11716*. 2021.

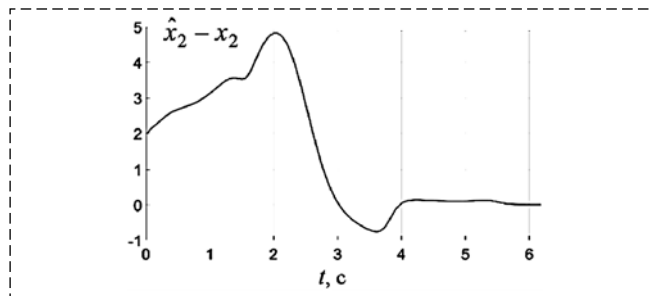


Рис. 9. Переходной процесс по ошибке $\hat{x}_2 - x_2$
Fig. 9. Transient process of error $\hat{x}_2 - x_2$

6. Zhang Q., Clavel A. Adaptive observer with exponential forgetting factor for linear time varying systems // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*. IEEE. 2001. T. 4. C. 3886—3891.
7. Gao F., Jiang G., Zhang Z., Song J. An adaptive observer for actuator and sensor fault diagnosis in linear time-varying systems // *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. IEEE. 2012. P. 3281—3285.
8. Wang F., Zong M., Chen W. Fault diagnosis of linear time-varying system based on high gain adaptive compensation sliding mode observer // *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. IEEE. 2017. P. 1688—1691.
9. Гайшун И. В. Об асимптотическом оценивании состояний линейных нестационарных систем со скалярным выходом // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. 2006. Т. 12. N. 2. С. 47—52.
10. Zhang J., Yin D., Zhang H. An improved adaptive observer design for a class of linear time-varying systems // *2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2011. P. 1395—1398.
11. Zhang Q. Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems // *IEEE transactions on automatic control*. 2002. Vol. 47, N. 3. P. 525—529.
12. Квакернаак А., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
13. Кочетков С. А. Об одном алгоритме идентификации параметров в линейных нестационарных системах // *Труды IX международной конференции "Идентификация систем и задачи управления" SICPRO'12*. 2012. С. 195—209.
14. Tranninger M., Seeber R., Zhuk S., Steinberger M., Horn M. Detectability Analysis and Observer Design for Linear Time Varying Systems. *IEEE Control Systems Letters*. 2020. Vol. 4, N. 2. P. 331—336. DOI: 10.1109/LCSYS.2019.2927549.
15. Tranninger M., Zhuk S., Steinberger M., Fridman L., Horn M. Non-Uniform Stability, Detectability, and, Sliding Mode Observer Design for Time Varying Systems with Unknown Inputs // *arXiv preprint arXiv:1809.06460*. 2018.
16. Rugh W. J. Linear system theory. Prentice-Hall, Inc., 1996.
17. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2016. Vol. 62, N. 7. P. 3546—3550.
18. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing // *2016 American Control Conference (ACC)*. IEEE. 2016. P. 6971—6976.
19. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / Учеб. пособ. СПб: Наука, 2000.
20. Ljung L. System identification // *Signal analysis and prediction*. Birkhäuser, Boston, MA, 1998. P. 163—173.
21. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

Adaptive State Observer for Linear Time-Varying System with Partially Unknown State Matrix and Input Matrix Parameters

A. A. Bobtsov¹, bobtsov@mail.ru, N. A. Nikolaev¹, nikona@yandex.ru, R. Ortega², romeo.ortega@itam.mx, O. V. Slita¹, o-slita@yandex.ru, O. A. Kozachek¹, oakozachek@mail.ru
¹ ITMO University, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation,
² Instituto Tecnológico Autónomo de México, México

Corresponding author: Bobtsov A. A., Dr. Sci., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: bobtsov@mail.ru

Accepted on March 15, 2022

Abstract

In this paper the problem of adaptive state observer synthesis for linear time-varying SISO (single-input-single-output) dynamical system with partially unknown parameters was considered. It is assumed that the input signal and output variable of the system are measurable. It is also assumed that the state matrix of the plant contains known variables and unknown constants when the input matrix (vector) is unknown. Observer synthesis is based on GPEBO (generalized parameter estimation based observer) method proposed in [1]. Observer synthesis provides preliminary parametrization of the initial system and its conversion to a linear regression model with further unknown parameters identification. For identification of the unknown constant parameters classical estimation algorithm — least squares method with forgetting factor — was used. This approach works well in cases, when the known regressor is "frequency poor" (i.e. the regressor spectrum contains $r/2$ harmonics, where r is a value of the unknown parameters) or does not meet PE (persistent excitation) condition. To illustrate performance of the proposed method, an example is provided in this paper. A time-varying second-order plant with four unknown parameters was considered. Parametrization of the initial dynamical model was made. A linear static regression with six unknown parameters (including unknown state initial conditions vector) was obtained. An adaptive observer was synthesized and the simulation results were provided to illustrate the purpose reached. The main difference with the results, that were published earlier in [2], is the new assumption that not only does the state matrix of the linear time-varying system contain unknown parameters, but input matrix (vector) contains unknown constant coefficients.

Keywords: adaptive observer, linear time-varying system, linear regression model

Acknowledgements: This work was supported by Russian Science Foundation, project no. 22-21-00499, <https://rscf.ru/project/22-21-00499/>.

For citation:

Bobtsov A. A., Nikolaev N. A., Ortega R., Slita O. V., Kozachek O. A. Adaptive State Observer for Linear Time-Varying System with Partially Unknown State Matrix and Input Matrix Parameters, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 283–288 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.23.283-288

References

1. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical—biological reactors, *Automatica*, 2021, vol. 129, pp. 109635.
2. Bobtsov A., Ortega R., Yi B., Nikolaev N. Adaptive state estimation of state-affine systems with unknown time-varying parameters, *International Journal of Control*, 2021, pp. 1–13.
3. Kalenova V. I., Morozov V. M. Linear time-variant systems and their applications to mechanics problems: schoolbook, Moscow, FIZMATLIT, 2010, 208 p. (in Russian).
4. Balandin D. V., Kogan M. M. Control and estimation in linear time-variant systems based on ellipsoid reachability sets, *Automat. and Telemekh.*, 2020, no. 8, pp. 8–28 (in Russian).
5. Glushchenko A., Lastochkin K. Robust Time-Varying Parameters Estimation Based on I-DREM Procedure, arXiv preprint arXiv:2111.11716, 2021.
6. Zhang Q., Clavel A. Adaptive observer with exponential forgetting factor for linear time varying systems, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control* (Cat. No. 01CH37228), IEEE, 2001, vol. 4, pp. 3886–3891.
7. Gao F., Jiang G., Zhang Z., Song J. An adaptive observer for actuator and sensor fault diagnosis in linear time-varying systems, *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE, 2012, pp. 3281–3285.
8. Wang F., Zong M., Chen W. Fault diagnosis of linear time-varying system based on high gain adaptive compensation sliding mode observer, *2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (IT-NEC)*, IEEE, 2017, pp. 1688–1691.
9. Gaishun I. V. About asymptotic state estimation for linear time-variant systems with scalar output, *Trudi Instituta matematiki i mehaniki UrO RAN*, 2006, vol. 12, no. 2, pp. 47–52 (in Russian).
10. Zhang J., Yin D., Zhang H. An improved adaptive observer design for a class of linear time-varying systems, *2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, IEEE, 2011, pp. 1395–1398.
11. Zhang Q. Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems, *IEEE transactions on automatic control*, 2002, vol. 47, no. 3, pp. 525–529.
12. Kvakernaak A., Sivan R. Linear optimal control systems, Moscow, Mir, 1977 (in Russian).
13. Kochetkov S. A. About some parameters identification algorithm in linear time-variant systems, *Trudi IX mezhdunarodnoy konferencii "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" SICPRO'12*, 2012, pp. 195–209 (in Russian).
14. Tranninger M., Seiber R., Zhuk S., Steinberger M. and Horn M. Detectability Analysis and Observer Design for Linear Time Varying Systems, *IEEE Control Systems Letter*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 331–336, doi: 10.1109/LCSYS.2019.2927549.
15. Tranninger M., Zhuk S., Steinberger M., Fridman L., Horn M. Non-Uniform Stability, Detectability, and, Sliding Mode Observer Design for Time Varying Systems with Unknown Inputs, arXiv preprint arXiv:1809.06460, 2018.
16. Rugh W. J. Linear system theory, Prentice-Hall, Inc., 1996.
17. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550.
18. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing, *2016 American Control Conference (ACC)*, IEEE, 2016, pp. 6971–6976.
19. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. Non-linear and adaptive control for complex dynamic systems, SPb, Nauka, 2000 (in Russian).
20. Ljung L. System identification, *Signal analysis and prediction*, Birkhäuser, Boston, MA, 1998, pp. 163–173.
21. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

А. Н. Жирабок^{1, 2}, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru,

Ким Чхун Ир¹, аспирант, kim.ci@dvfu.ru, Е. Ю. Бобко¹, ст. преподаватель, bobko.eyu@dvfu.ru,

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,

² Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток

Сравнительный анализ канонических форм в задачах диагностирования и оценивания*

Рассматриваются методы использования различных канонических форм при реализации средств функционального диагностирования и оценивания переменных технических систем, описываемых линейными динамическими моделями с возмущениями. Исследуются идентификационная и жорданова канонические формы реализации матрицы, описывающей динамику системы. Приводятся основные соотношения, описывающие процесс построения средств диагностирования и оценивания, и проведен сравнительный анализ результатов их использования при решении указанных задач. Показано, что идентификационная каноническая форма дает соотношения, на основе которых могут быть разработаны строгие алгоритмы решения задачи диагностирования и оценивания. В то же время каноническая форма Жордана предполагает использование эвристических методов в ходе решения отмеченных задач. Анализ показал, что жорданова форма более предпочтительна в случаях, когда при построении средств диагностирования и оценивания возможна полная развязка от внешних возмущений, поскольку она позволяет получить более простые расчетные соотношения. Вместе с тем, если возможна только частичная развязка от возмущений, идентификационная каноническая форма дает соотношения, на основе которых могут быть разработаны строгие алгоритмы решения, в то время как жорданова форма требует использования эвристик и не всегда приводит к оптимальному решению. Явным преимуществом жордановой формы является то, что она обеспечивает устойчивость проектируемой системы автоматически — исходя из вида матрицы этой формы, в то же время идентификационная каноническая форма предполагает обязательное использование обратной связи по сигналу невязки, который необходимо специально генерировать. Последнее обстоятельство при использовании жордановой формы в ряде случаев позволяет уменьшить размерность проектируемых средств диагностирования и оценивания. Предложен новый метод обеспечения чувствительности средств диагностирования к дефектам за счет анализа матрицы наблюдаемости системы и новых правил построения матриц, описывающих эти средства. Теоретические результаты иллюстрируются практическим примером известной трехтанковой системы.

Ключевые слова: линейные системы, канонические формы, дефекты, диагностирование, оценивание, наблюдатели

Введение

Функциональное диагностирование (ФД) является одним из действенных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем, поскольку оно позволяет проводить проверку правильности функционирования системы в процессе выполнения ею своих функций и своевременно давать информацию о возникающих сбоях и дефектах [1–5].

Главные задачи, которые должны быть решены при построении средств диагностирования, это чувствительность к дефектам и нечувствительность (или малая чувствительность) к возмущениям. При построении средств ФД, как правило, применяется идентификационная каноническая форма (ИКФ) [2, 3], которая позволяет получить простую процедуру их реализации. Помимо ИКФ при решении ряда других задач используется КФ Жордана [6, 7].

В работе рассматриваются обе упомянутые КФ и проводится их сравнительный анализ на примере решения задач ФД и оценивания заданной линейной функции вектора состояния системы. Кроме того, предлагается новый ме-

тод обеспечения чувствительности разрабатываемых средств диагностирования к дефектам.

Основные соотношения

Предполагается, что рассматриваемая система описывается линейными уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + Lp(t) + Dd(t), \\ y(t) &= Hx(t).\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода (показания имеющихся датчиков); F , G , L , H и D — известные матрицы соответствующих размеров; функция $d(t) \in R$ отражает дефекты в динамике системы, при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефектов $d(t)$ становится неизвестной функцией времени; слагаемое $Lp(t)$ описывает действующее на систему возмущение, $p(t) \in R^q$ предполагается неизвестной функцией времени.

Средства ФД и оценивания строятся на основе модели

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= F_*x_*(t) + J_*y(t) + G_*u(t); \\ y_*(t) &= H_*y(t); \\ r(t) &= R_*y(t) - y_*(t),\end{aligned}\quad (2)$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01303).

где $x_*(t) \in R^k$ — вектор состояния модели; $k < n$, F_* , J_* , G_* , H_* и R_* — матрицы, подлежащие определению; $r(t)$ — невязка, на основе которой принимается решение о появлении в диагностируемой системе дефектов; при отсутствии дефектов $r(t) = 0$.

Традиционно при решении задачи ФД предполагается, что после окончания переходного процесса векторы $x(t)$ и $x_*(t)$ связаны матрицей Φ , подлежащей определению:

$$x_*(t) = \Phi x(t).$$

Из систем (1) и (2) тогда можно получить уравнения, связывающие матрицы, описывающие эти системы [8–10]:

$$R_*H = H_*\Phi, \Phi F = F_*\Phi + J_*H, G_* = \Phi G. \quad (3)$$

Известно [8–10], что условие чувствительности модели (2) к дефектам имеет вид $\Phi D \neq 0$, условие нечувствительности к возмущениям — вид $\Phi L = 0$.

Допущение. Справедливо отношение $\text{Im}(D) \not\subset \text{Ker}(V^{(n)})$, где $V^{(n)}$ — матрица наблюдаемости:

$$V^{(n)} = \begin{pmatrix} H \\ HF \\ \vdots \\ HF^{n-1} \end{pmatrix};$$

$\text{Im}(D)$ — линейное подпространство, индуцированное столбцами матрицы D ; $\text{Ker}(V^{(n)})$ — ядро матрицы $V^{(n)}$, т.е. линейное подпространство, образованное такими векторами z , что $V^{(n)}z = 0$.

Замечание 1. Если система (1) наблюдаема, допущение выполняется автоматически, поскольку в этом случае $\text{Ker}(V^{(n)}) = \emptyset$.

Из принятого допущения следует $V^{(n)}D \neq 0$. Обозначим p — наименьшее целое, для которого $HF^pD \neq 0$, и j — целое с условием $H_jF^pD \neq 0$. Из сказанного следует, что p -я производная переменной $y_j(t)$ чувствительна к дефектам. Из общего определения матрицы R_* тогда следует, что если ее j -я позиция будет отличной от нуля, то использование ее в модели (2) гарантирует обнаружение дефекта, при этом время между его возникновением и появлением сигнала невязки $r(t) \neq 0$ будет минимальным.

Идентификационная каноническая форма

Задача диагностирования. Поскольку ИКФ традиционно используется для реализации средств диагностирования, приведем только основные соотношения, скорректированные с учетом того, что структура матрицы R_* уже частично определена — ее j -я позиция должна быть отличной от нуля; детали можно найти в работах [8–10].

В этом случае матрицы F_* и H_* в (2) ищутся в виде

$$F_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; H_* = (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0). \quad (4)$$

Известно, что с учетом этой формы уравнение для матрицы-строки R_* и строк $J_{*1}, J_{*2}, \dots, J_{*k}$ матрицы J_* принимает вид

$$(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})W^{(k)} = 0, \quad (5)$$

где

$$W^{(k)} = \begin{pmatrix} HF^k \\ HF^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}.$$

В работах [8–10] показано, что для обеспечения условия $\Phi L = 0$ нечувствительности к возмущению строка $(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})$ должна определяться из уравнения

$$(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})(W^{(k)} \ L^{(k)}) = 0, \quad (6)$$

где

$$L^{(k)} = \begin{pmatrix} HL & HFL & \dots & HF^{k-1}L \\ 0 & HL & \dots & HF^{k-2}L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Уравнение (6) имеет нетривиальное решение, если

$$\text{rank}(W^{(k)} \ L^{(k)}) < l(k+1), \quad (7)$$

$k \geq p$. После определения строки $(R_* \ -J_{*1} \ \dots \ -J_{*k})$ и проверки, является ли j -я позиция матрицы R_* ненулевой, по формулам

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= R_*H; \Phi_i F = \Phi_{i+1} + J_{*i}H_0; i = 1, \dots, k-1; \\ \Phi_k F &= J_{*k}H_0. \end{aligned} \quad (8)$$

вычисляются матрицы Φ и $G_* = \Phi G$. Если в полученном решении j -я позиция матрицы R_* нулевая, ищется другое решение уравнения (6).

Для обеспечения устойчивости наблюдателя в модель (2) вводится обратная связь по сигналу невязки:

$$\dot{x}_*(t) = F_*x_*(t) + J_*y(t) + G_*u(t) + Kr(t), \quad (9)$$

где матрица K ищется в виде $K = (k_1 \ k_2 \ \dots \ k_k)^T$. Исходя из заданных требований к качеству

переходного процесса в наблюдателе можно задать собственные числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ и определить коэффициенты $k_1, k_2, \dots, k_k$:

$$\begin{aligned} k_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k); \\ k_2 &= \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \dots + \lambda_{k-1} \lambda_k; \dots; \\ k_k &= (-1)^k \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k. \end{aligned}$$

Если условие (7) не выполняется при всех $k < n$, т. е. полная развязка от возмущений невозможна, необходимо искать робастное решение, когда вклад возмущения $\|\Phi L\|_F$ в модель минимален. Для этого следует найти все линейно независимые решения уравнения (5) вида $(R_*^{(j)} - J_1^{(j)} \dots - J_k^{(j)})$ для некоторой фиксированной размерности k . Все эти решения сводятся в матрицу

$$W = \begin{pmatrix} R_*^{(1)} & -J_1^{(1)} & -J_2^{(1)} & \dots & -J_k^{(1)} \\ & \dots & & & \\ R_*^{(n_*)} & -J_1^{(n_*)} & -J_2^{(n_*)} & \dots & -J_k^{(n_*)} \end{pmatrix},$$

каждая строка которой представляет некоторое решение уравнения (5). Задача состоит в определении такого вектора весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_{n_*})$, который дает минимум нормы Фробениуса $\|wWL^{(k)}\|_F$ при условии $\|w\| = 1$, которое необходимо для исключения тривиальных вариантов.

Для решения этой задачи используется сингулярное разложение матричного произведения $WL^{(k)}$, т. е. представление матрицы $WL^{(k)}$ в виде

$$WL^{(k)} = U_L \Sigma_L V_L,$$

где U_L и V_L — ортогональные матрицы, Σ_L в зависимости от соотношения чисел строк и столбцов матрицы $WL^{(k)}$ имеет вид

$$\begin{aligned} \Sigma_L &= (\text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_c) \ 0) \text{ или} \\ \Sigma_L &= \begin{pmatrix} \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_c) \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$c = \min(n_*, kq)$, $0 \leq \sigma_1 \leq \dots \leq \sigma_c$ — сингулярные числа матрицы $WL^{(k)}$, упорядоченные по возрастанию [11]. Выберем первый транспонированный столбец матрицы U_L в качестве вектора весовых коэффициентов $w = (w_1, \dots, w_{n_*})$, вычислим

$$(R_* - J_{*1} \dots - J_{*k}) = wW$$

и, если j -я позиция матрицы R_* отлична от нуля, используем полученное решение для построения модели. В противном случае выбираем другой столбец матрицы U_L или увеличиваем число решений n_* .

Задача оценивания. Эта задача рассматривается на примере построения виртуального датчика [3, 12–16]; поскольку она детально изложена в работе [16], приведем только основные соотношения.

Решение задачи состоит в построении наблюдателя, оценивающего переменную $y_v(t) = H_v x(t)$ с известной матрицей H_v . Такой наблюдатель, во-первых, для обеспечения его устойчивости должен оценивать некоторую компоненту вектора выхода $y_*(t) = H_* x_*(t)$, которая определяется матрицей R_v , для формирования невязки $r(t) = R_v y(t) - y_*(t)$. Компонента $y_*(t)$ и эта матрица неизвестны, они определяются в процессе решения основной задачи. Во-вторых, наблюдатель должен оценивать заданную переменную в виде $y_v(t) = H_{*v} x_*(t) + Qy(t)$.

Опуская детали (их можно найти в работе [16]), отметим, что в первой задаче решается уравнение

$$(R_v - J_{*1} \dots - J_{*k})(W^{(k)} \ L^{(k)}) = 0. \quad (10)$$

После определения из соотношения (10) строки $(R_v - J_{*1} \dots - J_{*k})$ по формулам (8), где матрица R_* заменяется на R_v , строится матрица Φ и проверяется условие

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H_v \end{pmatrix}. \quad (11)$$

При его выполнении матрицы H_{*v} и Q определяются из уравнения

$$H_v = H_{*v} \Phi + QH = (H_{*v} \ Q) \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}.$$

В противном случае нужно найти другое решение уравнения (10) при прежней или увеличенной размерности k .

Устойчивость наблюдателя обеспечивается по аналогии с описанным выше.

Каноническая форма Жордана

Основные соотношения. Матрица F_* здесь ищется в жордановой форме

$$F_* = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_k \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где по предположению собственные числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ задаются разными и отрицательными.

Тогда второе уравнение в (3) может быть представлено в виде k независимых уравнений

$$\Phi_i F = \lambda_i \Phi_i + J_{*i} H, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (13)$$

Дополнительное требование $\Phi L = 0$ — нечувствительность к возмущениям — учитывается следующим образом. Введем матрицу L_0 максимального ранга, такую что $L_0 L = 0$, тогда $\Phi = N L_0$ для некоторой матрицы N . В результате уравнения (13) могут быть записаны в виде

$$(N_i - J_{*i}) \begin{pmatrix} L_0(F - \lambda_i I_n) \\ H \end{pmatrix} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (14)$$

где I_n — единичная матрица. Условием разрешимости этого уравнения является ранговое неравенство

$$\text{rank} \begin{pmatrix} L_0(F - \lambda_i I_n) \\ H \end{pmatrix} < \text{rank}(L_0(F - \lambda_i I_n)) + \text{rank}(H).$$

Если при всех $\lambda < 0$ это условие не выполняется, то модели с требуемыми свойствами не существует, и поставленная задача решается робастными методами.

Задача диагностирования. Задавая конкретные значения λ_i , из уравнения (14) следует найти минимальное число строк $\Phi_i = N_i L_0$ матрицы Φ (а также строк вида J_{*i}), удовлетворяющих равенству $R_* H = H_* \Phi$. Запишем его в виде

$$(R_* - H_*) \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} = 0, \quad (15)$$

что эквивалентно условию

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} < \text{rank}(\Phi) + \text{rank}(H). \quad (16)$$

Если для найденных строк это условие выполняется, из уравнения (15) определяются матрицы R_* и H_* . Если j -я позиция матрицы R_* отлична от нуля, используем полученное решение для построения модели. В противном случае следует найти другие решения уравнения (14), удовлетворяющие условию (16). Предпочтение следует отдавать тем строкам Φ_i , у которых j -я позиция отлична от нуля.

Замечание 2. В силу независимости решений уравнения (13) друг от друга в матрице Φ должны остаться только те строки, удаление которых нарушает условие (16).

Для поиска робастного решения из уравнения (14) удаляется матрица L_0 :

$$(\Phi_i - J_{*i}) \begin{pmatrix} F - \lambda_i I_n \\ H \end{pmatrix} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (17)$$

и ищется минимальное число строк Φ_i , удовлетворяющих условию (16). При этом выбирать

их следует так, чтобы при наличии нескольких вариантов выбор делался исходя из минимума нормы $\|\Phi_i L\|_F$.

Задача оценивания. Задавая конкретные значения λ_i , из уравнения (14) следует найти минимальное число строк $\Phi_i = N_i L_0$ матрицы Φ (а также строк J_{*i}), которые удовлетворяют условию (11).

Замечание 3. Матрицы R_* и H_* в синтезе виртуального датчика не участвуют, поскольку в разделе 2 они использовались для введения обратной связи в целях обеспечения устойчивости наблюдателя, которая теперь прямо следует из жордановой формы матрицы F_* .

Для поиска робастного решения на основе (17) ищется минимальное число строк Φ_i , удовлетворяющих условию (11). При этом они определяются так, чтобы при наличии нескольких вариантов выбор делался исходя из минимума нормы $\|\Phi_i L\|_F$.

Сравнение

Проведем сравнение рассмотренных методов решения задач построения средств диагностирования на основе идентификационной и жордановой КФ. Отметим, прежде всего, что диагностический наблюдатель, реализованный в ИКФ, может быть преобразован в наблюдатель, реализованный в жордановой КФ. Действительно, пусть наблюдатель (9) с матрицей обратной связи K имеет собственные числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$; применим к нему преобразование подобия с матрицей T^{-1} , столбцы которой образованы собственными векторами, соответствующими числам $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$. Тогда матрица $T(F_* - K H_*)T^{-1}$, где F_* имеет форму (4), примет вид (12), поскольку преобразование подобия сохраняет собственные числа матрицы. При этом нечувствительность наблюдателя к возмущениям сохранится.

Как следует из результатов второго раздела, процедура построения диагностического наблюдателя минимальной размерности на основе ИКФ имеет регулярный характер и позволяет на основе матриц $W^{(k)}$ и $L^{(k)}$ найти все матрицы, описывающие наблюдатель, нечувствительный к возмущениям; несколько сложнее строится робастный наблюдатель.

Использование КФ Жордана позволяет в ряде случаев уменьшить сложность наблюдателя и упростить процедуру его синтеза при реализации требования нечувствительности к возмущениям, поскольку уравнение (14) проще, нежели (6). При этом, однако, эта процедура основана на некотором переборе вариантов решения. Кроме того, для жордановой КФ

усложняется процедура минимизации вклада возмущения в модель, когда необходимо найти робастное решение. Более того, жорданова КФ ограничивает возможности такой минимизации. Анализ показывает, что в этом случае предпочтительнее использовать ИКФ, которая за счет некоторого увеличения размерности модели позволяет более эффективно минимизировать вклад возмущения в модель.

Следует отметить также, что при диагностировании на основе соотношений паритета жорданова КФ неприменима, необходимо использовать ИКФ.

Более предпочтительной КФ Жордана является при решении задачи оценивания, поскольку отсутствие необходимости оценивать переменную $y_*(t) = R_v x(t)$ позволяет уменьшить размерность наблюдателя. Как и выше, для жордановой КФ усложняется процедура минимизации вклада возмущения в модель, когда необходимо найти робастное решение.

Пример

Рассмотрим систему управления

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= u_1(t)/\vartheta_1 - b_1(x_1(t) - x_2(t)), \\ \dot{x}_2(t) &= u_2(t)/\vartheta_2 + b_1(x_1(t) - x_2(t)) - b_2(x_2(t) - x_3(t)), \\ \dot{x}_3(t) &= b_2(x_2(t) - x_3(t)) - b_3(x_3(t) - \vartheta_3) + \rho(t), \\ y_1(t) &= x_2(t), \quad y_2(t) = x_3(t).\end{aligned}\quad (18)$$

Уравнения (18) описывают так называемую трехтанковую систему, детально рассмотренную в работе [16]. Для простоты примем $\vartheta_1 = 1$, $\vartheta_2 = 1$, $\vartheta_3 = 0$, $b_1 = b_2 = b_3 = 1$.

Как и в работе [16], примем $y_v(t) = x_1(t)$, $H_v = (1 \ 0 \ 0)$ и построим виртуальный датчик минимальной размерности. Приведем матрицы, описывающие систему (18):

$$F = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, L_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Уравнение (14) принимает вид

$$\begin{aligned}(N_i \ -J_{*i}) \begin{pmatrix} L_0(F - \lambda_i I_n) \\ H \end{pmatrix} = \\ = (N_i \ -J_{*i}) \begin{pmatrix} -1 - \lambda & 1 & 0 \\ 1 & -2 - \lambda & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 0.\end{aligned}$$

Примем $\lambda = -1$, тогда $N = (1 \ 0)$, $J_* = (1 \ 0)$, откуда $\Phi = (1 \ 0 \ 0)$, $G_* = (1 \ 0)$. Нетрудно проверить, что условие (11) выполняется и $H_{*v} = 1$, $Q = 0$. Виртуальный датчик принимает вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= -x_*(t) + y_1(t) + u_1(t), \\ y_v(t) &= x_*(t).\end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что он заметно проще, нежели датчик, полученный в работе [16].

Заключение

В работе рассматриваются методы решения задач диагностирования и оценивания на основе идентификационной и жордановой КФ. Предложен новый метод обеспечения чувствительности средств диагностирования к дефектам. Проведенный сравнительный анализ показал достоинства и недостатки каждого метода.

Список литературы

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.
2. Шумский А. Е., Жирабок А. Н. Методы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. [Электронный ресурс]. Владивосток: ДВФУ, 2018.
3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and fault-tolerant control. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
4. Witczak M. Fault diagnosis and fault tolerant control strategies for nonlinear systems. Berlin: Springer, 2014.
5. Elsobet T., Bregon A., Pulido B., Puig V. Fault diagnosis of dynamic systems. Berlin: Springer, 2019.
6. Efimov D., Polyakov A., Richard J. Interval observer design for estimation and control of time-delay descriptor systems // European Journal of Control. 2015. Vol. 23. P. 26–35.
7. Kolesov N., Gruzlikov A., Lukoyanov E. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty // Proc. XII-th Inter. Symp. Intelligent Systems, IN-TELS'16, 5-7 October 2016, Moscow, Russia. P. 499–504.
8. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е. Диагностирование линейных динамических систем: подход на основе скользящих наблюдателей // Автоматика и телемеханика. 2020. № 2. С. 18–35.
9. Жирабок А. Н., Зуев А. В., Бобко Е. Ю., Филатов А. Л. Решение задачи аккомодации в нелинейных системах с использованием линейных методов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т.21, № 1. С. 21–27.
10. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V. Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers // Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2020. Vol. 30, N. 4. P. 679–688.
11. Low X., Willsky A., Verghese G. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems // Automatica. 1996. V. 22. P. 333–344.
12. Heredia G., Ollero A. Virtual sensor for failure detection, identification and recovery in the transition phase of a morphing aircraft // Sensors. 2010. Vol. 10. P. 2188–2201.
13. Luzar M., Witczak M. Fault-tolerant control and diagnosis for LPV system with H-infinity virtual sensor // Proc. 3rd Conf. Control and Fault-Tolerant Systems. Barcelona, Spain, 2016. P. 825–830.

14. Jove E., Casteleiro-Roca J., Quntian H., Mendez-Peréz J., Calvo-Rolle J. Virtual sensor for fault detection, isolation and data recovery for bicomponent mixing machine monitoring // *Informatica*. 2019. Vol. 30, N. 4. P. 671–687.

15. Hosseinpour Z., Arefi M., Razavi-Far R., Mozafari N., Hazbavi S. Virtual sensors for fault diagnosis: a case of induction

motor broken rotor bar // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, N. 4. P. 5044–5051.

16. Жирабок А. Н., Ким Чхун Ир. Виртуальные датчики в задаче функционального диагностирования // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2021. Т. 22, № 6. С. 298–303.

Comparative Analysis of Canonical Forms in Fault Diagnosis and Estimation Problems

A. N. Zhirabok^{1, 2}, zhirabok@mail.ru, C. I. Kim¹, kim.ci@dvfu.ru, E. Yu. Bobko¹, bobko.eyu@dvfu.ru,

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation,

² Institute of Marine Technology Problems, Vladivostok, 690950, Russian Federation

Corresponding author: Zhirabok Aleksei N., Dr. of Sci., Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950, Russian Federation, e-mail: zhirabok@mail.ru

Accepted on February 21, 2022

Abstract

The paper considers the methods of different canonical forms application to the problems of fault diagnosis and estimation in technical systems described by linear dynamic models under disturbances. Identification and Jordan canonical forms are investigated. The main relations describing fault diagnosis and estimation problems for different canonical forms are given, and comparative analysis of possibility of their application is performed. An analysis shows that the identification canonical form produces relations enable developing algorithms for the diagnostic observer and estimator design while Jordan canonical form assumes using some heuristic methods. It was shown that Jordan canonical form is more preferable to guarantee full disturbance decoupling, that is invariance with respect to the disturbance. On the other hand, when full decoupling is impossible, the identification canonical form enables developing algorithm of partial decoupling while Jordan canonical form assumes using some heuristic methods. The advantage of Jordan canonical form is that it ensures stability of the designed system based on properties of the matrix describing this form while the identification canonical form assumes using feedback based on the residual which must be generated. This allows for Jordan canonical form to reduce the dimension of the designed diagnostic observer and estimator. The new method to guarantee sensitivity of the diagnostic observer to the faults is developed. The method is based on analysis of the observability matrix and new rules to calculate matrices describing the diagnostic observer. Theoretical results are illustrated by practical example of well known three tank system.

Keywords: linear systems, canonical forms, faults, diagnosis, estimation, observers

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Scientific Foundation, project no. 22-29-01303.

For citation:

Zhirabok A. N., Kim C., Bobko E. Yu. Comparative Analysis of Canonical Forms in Fault Diagnosis and Estimation Problems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 289–294.

DOI: 10.17587/mau.23.289-294

References

1. Mironivskii L. A. Functional diagnosis in dynamic systems, Moscow, Publishing house of MSU, 1998, 256 p. (in Russian).

2. Shumsky A., Zhirabok A. Methods for fault diagnosis and fault tolerant control in dynamic systems, Vladivostok, Publishing house of FESTU, 2018, 173 p. (in Russian).

3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Berlin, Springer-Verlag, 2006.

4. Witczak M. Fault diagnosis and fault tolerant control strategies for nonlinear systems, Berlin, Springer, 2014.

5. Elsobet T., Bregon A., Pulodo B., Puig V. Fault diagnosis of dynamic systems, Berlin, Springer, 2019.

6. Efimov D., Polyakov A., Richard J. Interval observer design for estimation and control of time-delay descriptor systems, *European Journal of Control*, 2015, vol. 23, pp. 26–35.

7. Kolesov N., Gruzlikov A., Lukyanov E. Using fuzzy interacting observers for fault diagnosis in systems with parametric uncertainty, *Proceedings of XII-th Inter. Symp. Intelligent Systems, INTELS'16*, 5–7 October 2016, Moscow, Russia, pp. 499–504.

8. Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A. Diagnosis of linear dynamic systems: an approach based on sliding mode observers, *Automation and Remote Control*, vol. 81, 2020, pp. 18–35.

9. Zhirabok A., Zuev A., Bobko E., Filatov A. Fault accommodation problem solution in nonlinear systems using linear

methods, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 1, pp. 21–27.

10. Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V. Fault identification in underwater vehicle thrusters via sliding mode observers, *Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 679–688.

11. Low X., Willsky A., Verghese G. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems, *Automatica*, vol. 22, 1996, pp. 333–344.

12. Heredia G., Ollero A. Virtual sensor for failure detection, identification and recovery in the transition phase of a morphing aircraft, *Sensors*, 2010, vol. 10, pp. 2188–2201.

13. Luzar M., Witczak M. Fault-tolerant control and diagnosis for LPV system with H-infinity virtual sensor, *Proceedings of 3rd Conf. Control and Fault-Tolerant Systems*, 2016. Barcelona, Spain, pp. 825–830.

14. Jove E., Casteleiro-Roca J., Quntian H., Mendez-Peréz J., Calvo-Rolle J. Virtual sensor for fault detection, isolation and data recovery for bicomponent mixing machine monitoring, *Informatica*, 2019, vol. 30, no. 4, pp. 671–687.

15. Hosseinpour Z., Arefi M., Razavi-Far R., Mozafari N., Hazbavi S. Virtual sensors for fault diagnosis: a case of induction motor broken rotor bar, *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 5044–5051.

16. Zhirabok A., Kim C. Virtual sensors in the fault diagnosis problem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 6, pp. 298–303.

Ю. А. Быковцев, аспирант, ассистент, bykovcev@mirea.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва

Синтез нечеткого регулятора на основе оценки степени устойчивости системы управления

Обсуждается решение задачи анализа и синтеза системы управления с нечетким регулятором (нечеткой системы управления) на основе оценки степени устойчивости. По мере возрастания интереса к нечетким системам управления все более активно разрабатываются различные подходы к исследованию таких систем. Одно из наиболее активно развивающихся направлений основывается на модификации методов оценки областей устойчивости нелинейных САУ, однако, при решении большинства практических задач этих знаний недостаточно, поскольку разработчику необходимо обеспечить требуемые качественные характеристики переходного процесса (и, в частности, время регулирования). В основу предлагаемого решения положен критерий абсолютной устойчивости для системы с аппроксимированной нелинейной характеристикой нечеткого регулятора, которая может быть получена непосредственно на основе применения метода Сугено. В статье разрабатывается модифицированный под нечеткую систему управления круговой критерий абсолютной устойчивости Якубовича, использующий смещенную АФЧХ линейной части. При таком подходе удастся получить вполне конструктивное решение задачи синтеза параметров нечеткого регулятора в частотной области. На примере нечетких систем управления со статической и астатической линейными частями показаны особенности применения разработанного подхода и предложены методики синтеза параметров нечеткого регулятора. Проведен анализ влияния отдельных компонент нелинейного преобразования на качество переходного процесса, и на основе этого дан ряд практических рекомендаций по коррекции настроек нечеткого регулятора, обеспечивающих требуемое быстродействие.

Ключевые слова: степень устойчивости, нечеткий регулятор, абсолютная устойчивость, круговой критерий, нечеткая модель Сугено

Введение

По мере совершенствования современных быстродействующих САУ как военного, так и гражданского назначения острой становится потребность в разработке новых регуляторов и, соответственно, подходов к анализу и синтезу систем управления с такими регуляторами. С одной стороны, это объясняется известным принципом несовместимости, утверждающим обратную пропорциональность между сложностью системы и точностью ее анализа классическими математическими методами, а с другой — сложностью формализации неопределенностей, многочисленные источники которых имеют различную природу и проявляются по мере усложнения функциональных задач, стоящих перед системой управления. В то же время, появившиеся за последние несколько десятилетий работы как отечественных, так и зарубежных авторов доказывают перспективность применения для совершенствования характеристик системы управления интеллектуальных технологий и, в частности, технологии нечеткой логики [1–6].

В статье решается задача синтеза параметров нечеткого регулятора на основе косвенной оценки качества САУ — степени устойчивости. Такой вид оценки качества (и, в первую очередь, быстродействия) показал хорошую

эффективность и получил достаточно широкое распространение в инженерной практике синтеза линейных САУ [8–10].

Поскольку САУ с нечеткими регуляторами относятся к классу нелинейных систем, то непосредственно применить к ним предложенную методику синтеза невозможно. Однако в ряде классических работ (например, в [11]) показано, что рассматриваемый показатель качества можно распространить и на нелинейные системы, понимая под степенью устойчивости желаемый показатель затухания экспоненциальной кривой, который рассчитывается из условия нахождения "смещенной" системы на границе устойчивости. При таком подходе, рассматривая смещенную частотную характеристику линейной части, удобно решать задачу анализа и синтеза нелинейных законов на основе методов абсолютной устойчивости.

Постановка задачи

Рассматривается одноконтурная САУ с нечетким регулятором (нечеткая система управления), структурная схема которой представлена на рис. 1, а, где НР — нечеткий регулятор с одним входом и одним выходом, ЛЧ — линейная часть (объект управления) с передаточной функцией $W_{\text{ЛЧ}}(s)$. Требуется настроить НР

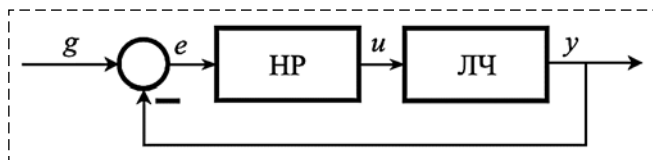


Рис. 1. Структурная схема САУ с НР
Fig. 1. Structural diagram of ACS with FR

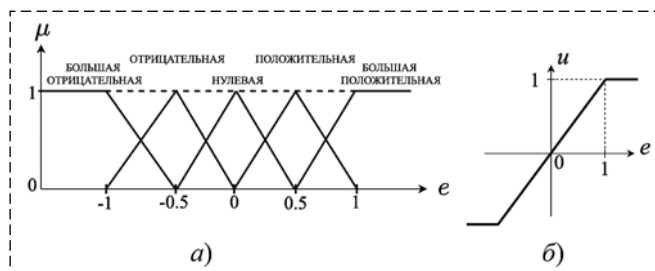


Рис. 2. Расположение ФП входных терм (а) и нелинейное преобразование НР (б)
Fig. 2. The location of the MF of the input terms (a) and the non-linear transformation of the FR (b)

таким образом, чтобы переходной процесс в системе был быстрее, чем $Ae^{-\eta_0 t}$, где A — начальное отклонение, η_0 — некоторая требуемая степень устойчивости.

В качестве первого приближения рассмотрим канонический вариант НР с пятью функциями принадлежности (ФП) для входной и выходной переменных. На рис. 2, а представлено расположение ФП входных терм НР, а на рис. 2, б — вид конечного нелинейного преобразования, полученного при следующей структуре продукционных правил:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 1$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,5$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,5$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -1$.

Для данного регулятора на рис. 3, б приведена переходная характеристика $e(t)$ ошибки в нечеткой системе совместно с кривой $e^{-\eta_0 t}$. Из рисунка видно, что равномерное распределение ФП входных терм не позволяет обеспечить поставленное перед САУ требование по степени устойчивости. Проведем (не давая специальных пояснений, которые будут обоснованы ниже) некоторую подстройку НР, изменив два продукционных правила:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 2$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -2$.

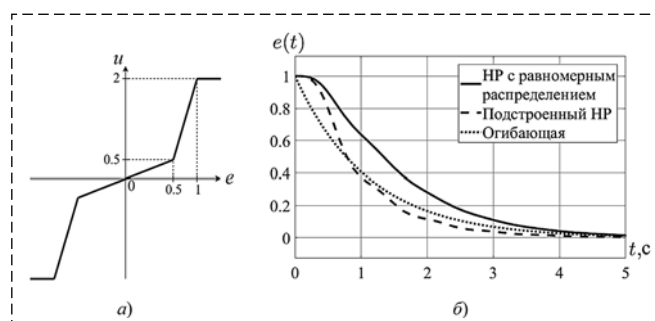


Рис. 3. Характеристика подстроенного НР (а) и переходные процессы в нечеткой САУ совместно с огибающей (б)
Fig. 3. Characteristic of the modernized FR (a) and transient processes in the fuzzy ACS together with the envelope (b)

Как видно, подстроенный НР обеспечивает нелинейное преобразование вход—выход, представленное на рис. 3, а, соответствующий переходной процесс отвечает поставленному требованию (рис. 3, б).

Выполненная в приведенном выше примере подстройка НР была реализована на основе некоторого опыта работы с нечеткими системами. Однако, используя известные в ТАУ результаты в области исследования устойчивости и качества нелинейных САУ, можно построить достаточно простую и удобную для инженерной практики методику, которая будет разработана ниже.

Анализ нечеткой системы управления на основе смещенной частотной характеристики

Рассмотрим совместно с исходной передаточной функцией линейной части $W_{\text{ЛЧ}}(s)$ смещенную передаточную функцию, полученную заменой $s = j\omega - \eta$, где η — аналог степени устойчивости. Для большей конкретности передаточную функцию линейной части возьмем в виде

$$W_{\text{ЛЧ}}(s) = K_{\text{ЛЧ}}[a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4]^{-1}.$$

После элементарных преобразований частотная характеристика смещенной линейной части $\bar{W}_{\text{ЛЧ}}$ приводится к виду

$$\bar{W}_{\text{ЛЧ}}(j\omega - \eta) = K_{\text{ЛЧ}} \left[\frac{a}{a^2 + b^2} - j \frac{b}{a^2 + b^2} \right], \quad (1)$$

где

$$a(\omega, \eta) = a_0 \eta^4 + a_0 \omega^4 - 6a_0 \omega^2 \eta^2 + 3a_1 \omega^2 \eta - a_1 \eta^3 + a_2 \eta^2 - a_2 \omega^2 - a_3 \eta + a_4,$$

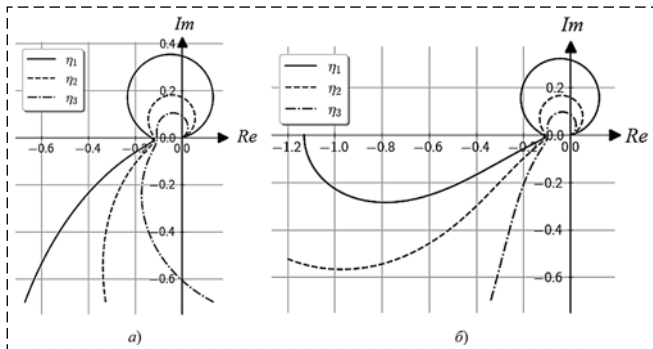


Рис. 4. АФЧХ статической (а) и астатической (б) линейных частей при разных значениях степени устойчивости

Fig. 4. Nyquist plot of the static (a) and astatic (b) linear part with different values of the degree of stability

$$b(\omega, \eta) = 4a_0\omega^3\eta - 4a_0\omega\eta^3 + \\ + 3a_1\omega\eta^2 - a_1\omega^3 - 2a_2\omega\eta + a_3\omega.$$

На рис. 4 представлены смещенные АФЧХ статической (рис. 4, а) и астатической ($a_4 = 0$) (рис. 4, б) версий линейной части при различных значениях степени устойчивости η ($\eta_1 > \eta_2 > \eta_3$).

Для исследования устойчивости нечеткой системы со смещенной линейной частью и определения граничных значений параметров НР, соответствующих заданной степени устойчивости, предлагается использование методов абсолютной устойчивости.

В работе [7] показано, что анализ нечетких САУ существенно упрощается, если рассматривать не гладкую, а аппроксимированную нелинейную характеристику НР, на которой выделяются два кусочно-линейных участка с коэффициентами усиления K_1 и K_2 (участки "малого" и "большого" коэффициентов усиления соответственно). В таком случае предпочтительно использовать модель Сугено в качестве механизма нечеткого логического вывода с постоянными функциями принадлежности выходных терм, так как с помощью нее удастся сразу получить кусочно-линейную характеристику НР без дополнительной аппроксимации.

Следует подчеркнуть, что данный подход для определенного класса нелинейных систем рассматривался в работе [11] и был построен на базе критерия абсолютной устойчивости В. М. Попова, который позже применялся к системе со смещенной АФЧХ линейной части. Более конструктивное решение может быть получено на основе критерия Якубовича, разработанного в работе [12]. Теорема, сформулированная в ней и модифицированная под нечеткую систему, может

быть представлена следующим образом: для абсолютной устойчивости нечеткой системы из класса $(K_1; K_2)$, имеющей степень устойчивости не менее η , достаточно, чтобы смещенная АФЧХ линейной части располагалась вне круга, ограниченного окружностью с центром на вещественной оси в точке $-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right)$, проходящей через точки $-\frac{1}{K_1}$ и $-\frac{1}{K_2}$, также принадлежащие действительной оси. Причем, так как вариантов расположения окружности с центром на действительной оси может быть несколько, смещенная АФЧХ при $-\infty \leq \omega \leq +\infty$ должна охватывать любую внутреннюю точку области $\left[-\frac{1}{K_1}; -\frac{1}{K_2}\right]$ столько раз, сколько полюсов передаточной функции линейной части располагаются в области $\Re s > -\eta$. Данное обстоятельство крайне важно, так как если рассматривать астатический вариант линейной части, то ее передаточная функция всегда содержит один полюс, лежащий правее $-\eta$, а значит, смещенная АФЧХ должна один раз охватить какую-либо внутреннюю точку области. Графически это означает, что для таких систем соответствующая круговому критерию окружность должна располагаться правее крайней левой точки смещенной АФЧХ.

Покажем на ряде примеров процесс синтеза НР на основе предложенного критерия. Рассмотрим астатическую САУ, линейная часть которой описывается передаточной функцией четвертого порядка, где $K_{лч} = 1$, $a_0 = 0,01$, $a_1 = 0,05$, $a_2 = 0,65$, $a_3 = 1,6$, $a_4 = 0$. Для данной САУ зададимся степенью устойчивости $\eta = 1$, что соответствует затуханию переходной характеристики примерно за 3 с. Так как рассматриваемая линейная часть содержит четыре полюса — два чисто действительных (0 и $-2,72$) и два комплексно-сопряженных ($-1,14 \pm j7,58$), то для обеспечения выбранной степени устойчивости необходимо расположить окружность таким образом, чтобы смещенная АФЧХ охватила ее только один раз.

На рис. 5, а представлены смещенная АФЧХ линейной части ($\bar{W}_{лч}(j\omega - 1)$), а также окружность, пересекающая действительную ось в точках $-0,8$ и $-0,5$. Согласно вышеописанному критерию, для обеспечения требуемой степени устойчивости достаточно, чтобы нелинейная характеристика НР располагалась в секторе $\left(\frac{1}{0,8}; \frac{1}{0,5}\right)$ (рис. 5, б).

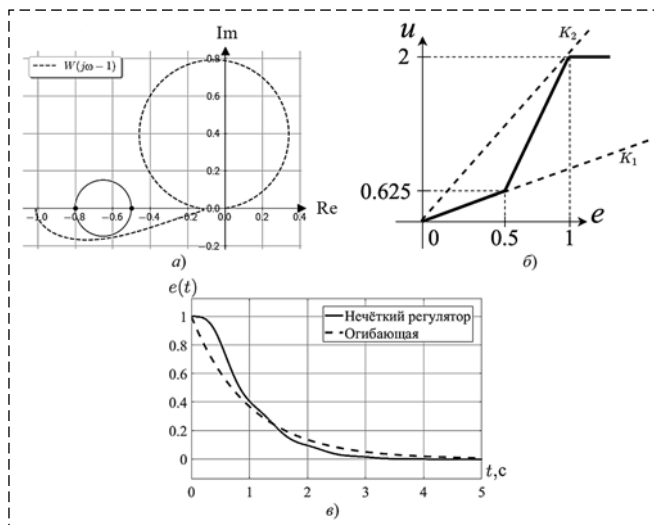


Рис. 5. Круговой критерий абсолютной устойчивости (а), нелинейная характеристика нечеткого регулятора (б) и сравнение переходного процесса с огибающей (в)

Fig. 5. Circular criterion of absolute stability (a), nonlinear characteristic of the fuzzy controller (b) and comparison of the transient process with the envelope (c)

На рис. 5, в представлен переходной процесс $e(t)$ в нелинейной САУ, содержащей нелинейный элемент с синтезированной характеристикой (рис. 5, б), при подаче единичного задающего воздействия, из которого очевидно выполнение задания. Для обеспечения нечетким регулятором данного нелинейного преобразования следует в параметрах регулятора изменить значения ФП выходных терм, не изменяя расположения ФП входных терм, а именно:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 2$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,625$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,625$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -2$.

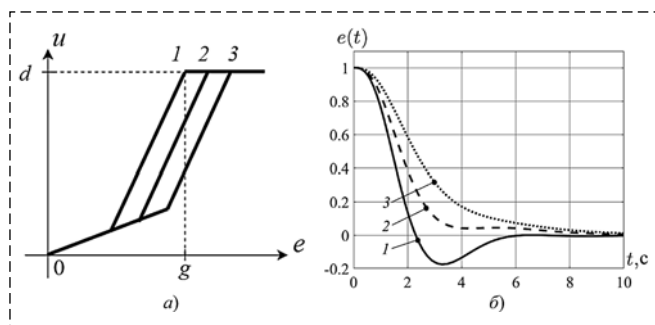


Рис. 6. Статические характеристики (а) и переходные процессы ошибки (б) при смещении участка "большого" коэффициента усиления

Fig. 6. Static characteristics (a) and error transients (b) when shifting the section of the "large" gain

Ввиду достаточности критерия абсолютной устойчивости, лежащего в основе рассматриваемой методики синтеза нелинейного закона управления НР, правомерно сделать следующее замечание: если по окончании процедуры синтеза статической характеристики НР возникает необходимость в некотором улучшении переходного процесса, то рекомендуется ввести дополнительную коррекцию нелинейной характеристики НР, которая может быть выполнена по двум направлениям:

- 1) смещение влево/вправо участка "большого" коэффициента усиления без изменения степени наклона;
- 2) изменение наклона участков "малого" и "большого" коэффициентов усиления.

На рис. 6, а представлены три варианта нелинейных характеристик НР, а на рис. 6, б — переходные процессы ошибки в рассматриваемой нечеткой системе при единичном задающем воздействии. Из данных рисунков видно, что смещение участка "большого" коэффициента усиления вправо уменьшает значение перерегулирования. Необходимо отметить, что диапазон смещения участка ограничен, с одной стороны, точкой перегиба нелинейной характеристики (дальнейшее движение вправо вырождает регулятор в линейный), а с другой — границей участка насыщения.

Изменение наклона участков "малого" и "большого" коэффициентов усиления также существенным образом влияет на качество управления. Так, увеличение крутизны данных участков приводит к возрастанию перерегулирования. При этом изменение "малого" участка (рис. 7, а), очевидно влияет на переходной процесс вблизи положения равновесия (рис. 7, б) и оказывает малое влияние на начальной стадии переходного процесса, в то время как "большой" участок влияет на переходной процесс в целом (рис. 7, в и рис. 7, г).

Таким образом, в число дополнительных рекомендаций к предложенной выше методике синтеза НР можно включить следующие:

1. Для увеличения быстродействия САУ необходимо сдвинуть ФП входных терм ближе к центру или увеличить значения ФП выходных терм с учетом максимально допустимых управляющих воздействий.
2. Для уменьшения перерегулирования следует раздвинуть границы боковых ФП входных терм-множеств.

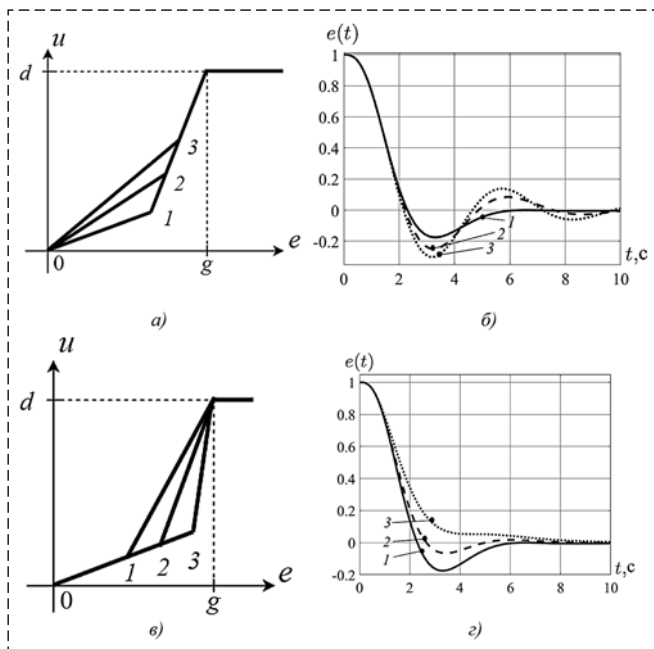


Рис. 7. Статические характеристики (а, в) и переходные процессы ошибки (б, г) при изменении наклона участка "малого" и "большого" коэффициентов усиления

Fig. 7. Static characteristics (a, v) and error transients (б, г) when the slope of the "small" and "large" gain sections changes

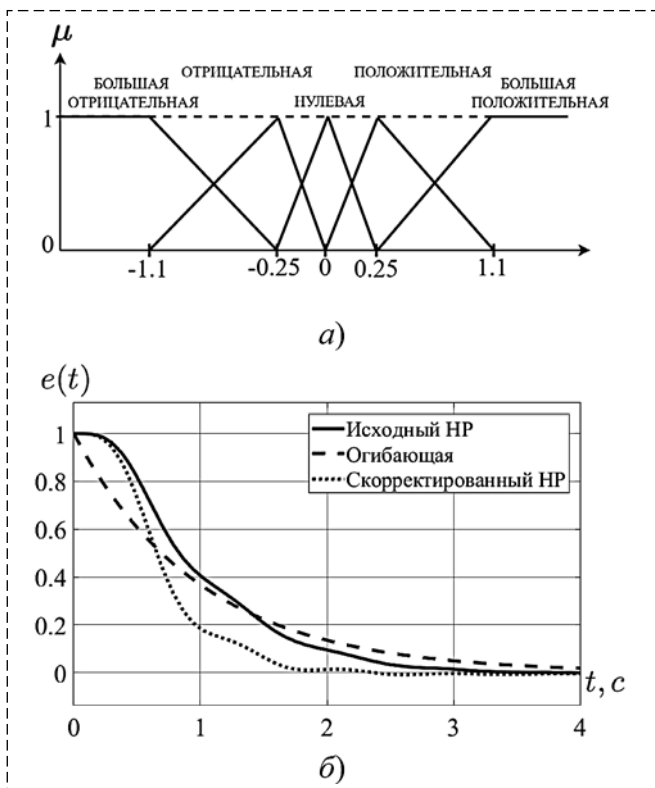


Рис. 8. Расположение ФП входных терм (а) и сравнение переходных процессов в САУ с исходным и скорректированным НР (б)

Fig. 8. The location of the MF of the input terms (a) and the comparison of transient processes in the ACS with the original and corrected FR (б)

Для рассматриваемой нечеткой САУ с астатическим объектом управления качественное улучшение переходного процесса (уменьшение времени регулирования примерно на 50 %) достигается (рис. 8, б), если сдвинуть вершины ФП входных терм "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" и "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ" ближе к центру, а также увеличить значения ФП выходных терм, активируемых правилами "Если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" ... " и "Если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ" ... ". На рис. 8, а представлено скорректированное с учетом дополнительных рекомендаций расположение ФП входных терм, а конечные продукционные правила имеют следующую структуру:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 3$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,15$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,15$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -3$.

Рассмотрим процедуры синтеза нечеткой САУ со статической линейной частью, передаточная функция которой имеет следующие параметры: $K_{\text{ЛЧ}} = 1$, $a_0 = 0,01$, $a_1 = 0,05$, $a_2 = 0,65$, $a_3 = 1,6$, $a_4 = 1$. Пусть для данной системы также задано требование по обеспечению степени устойчивости $\eta = 1$, значение которой выбрано из тех же соображений, что и для рассмотренной ранее астатической линейной части. На рис. 9 представлена процедура синтеза НР: в соответствии с круговым критерием построены $\bar{W}_{\text{ЛЧ}}(j\omega - 1)$ и касающаяся ее окружность, пересекающая действительную ось в точках -1 и $-0,45$.

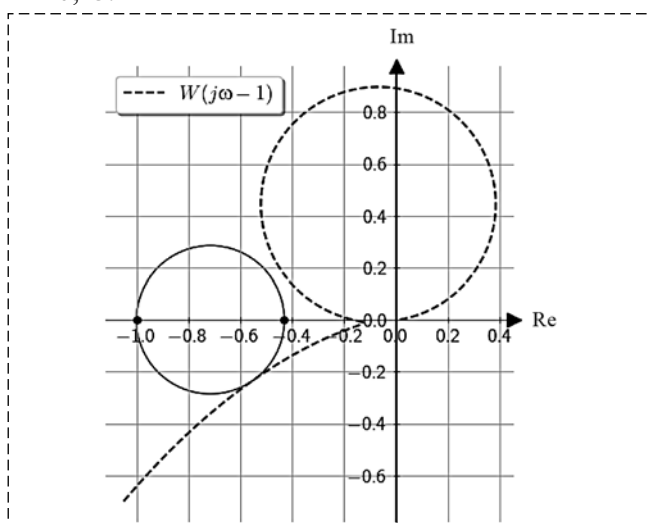


Рис. 9. Синтез НР в САУ со статической линейной частью

Fig. 9. Synthesis of FR in ACS with a static linear part

При синтезе настроек НР рассматриваем два варианта: равномерное расположение ФП входных терм и расположение с учетом дополнительных рекомендаций. Значения выходных ФП выберем из следующих соображений: так как рассматриваемая нечеткая САУ является нелинейной, то для такой системы следует рассматривать не абсолютную устойчивость положения равновесия (как это было выше), а абсолютную устойчивость процессов, причем найденные на основе кругового критерия значения $K_1 = 1$ и $K_2 = \frac{1}{0,45} = 2,2$ ограничивают значение производной нелинейной характеристики НР, т. е. $K_1 \leq \frac{du(e)}{de} \leq K_2$. Обозначив $p = 0,5$ и $q = 1$ координаты ФП входных терм "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" и "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" соответственно (в этом случае используется их равномерное расположение, как показано на рис. 2, а), можно рассчитать необходимое значение ФП выходной термы $b = pK_1 = 0,5$ для правила "Если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" ... " и значение ФП выходной термы $d = (q - p)K_2 + b = 1,6$ для правила "Если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" ... ". Итоговые продукционные правила имеют следующий вид:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 1,39$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,4$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,4$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -1,39$.

На рис. 10, а показана соответствующая выбранным настройкам нелинейная характеристика НР, а на рис. 10, б — переходной процесс в САУ с НР совместно с огибающей переходного процесса.

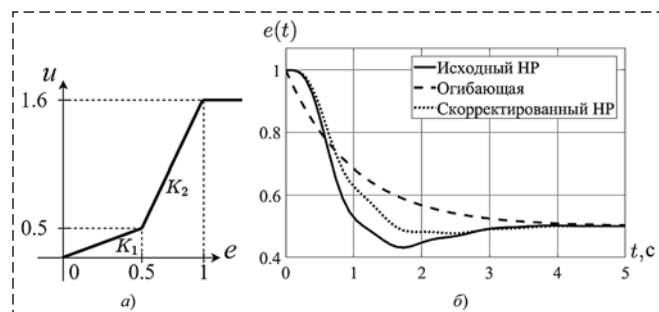


Рис. 10. Нелинейная характеристика скорректированного НР (а) и сравнение переходных процессов в САУ с исходным и скорректированным НР (б)

Fig. 10. Nonlinear characteristic of the corrected FR (a) and comparison of transient processes in the ACS with the original and modified FR (b)

Анализируя переходной процесс, несложно убедиться, что нечеткая САУ обладает требуемой степенью устойчивости, и переходной процесс $e(t)$ располагается ниже заданного значения. Если качество данного процесса не соответствует исходным требованиям, например из-за "провала" при $t = 1,5$ с, то можно рассмотреть второй вариант с привлечением дополнительных рекомендаций:

- раздвинуть ФП входных терм от центра, при этом изменив значения ФП выходных терм так, чтобы сохранить коэффициенты усиления на двух участках характеристики НР

Итоговый скорректированный переходной процесс приведен на рис. 10, б.

Заключение

Предложенная в данной статье методика синтеза параметров нечеткого регулятора, построенная на основе оценки степени устойчивости — одного из наиболее распространенных в инженерной практике косвенных показателей качества, обеспечивает в нечеткой системе заданное быстродействие. При необходимости одновременного обеспечения в нечеткой системе заданных точностных характеристик удобно использовать результаты работы [13], в которой для подстройки параметров НР, влияющих на точность, используются те же инструментальные переменные — базисные параметры НЛВ, что и для обеспечения требуемого быстродействия.

Список литературы

1. **Piegat A.** Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag Heidelberg, 2001. 728 p.
2. **Jantzen J.** Foundations of fuzzy control: a practical approach. John Wiley & Sons, 2013. 352 p.
3. **Tanaka K., Sano M.** On the concepts of regulator and observer of fuzzy control systems // Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference. 1994. Vol. 2. P. 767—772.
4. **Choi H. H., Jung J.** Discrete-time fuzzy speed regulator design for PM synchronous motor // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 60, N. 2. P. 600—607.
5. **Макаров И. М., Лохин В. М.** Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления. М.: Наука, 2009. 227 с.
6. **Kluska J., Żabiński T.** PID-like adaptive fuzzy controller design based on absolute stability criterion // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 28, N. 3. P. 523—533.
7. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С.** Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления // Информационные технологии. Приложение. 2013. № 2. 31 с.
8. **Шубладзе А. М.** Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. 1980. № 1. С. 28—37

9. Azimi S. M., Naghizadeh R. A., Kian A. R. Optimal controller design for interconnected power networks with predetermined degree of stability // *IEEE Systems Journal*. Vol. 13, N. 3. P. 3165–3175.

10. Литвинов Н. Д. Метод расположения корней характеристического полинома, обеспечивающий заданную степень устойчивости и колебательность системы // *Автоматика и телемеханика*. 1995. № 4. С. 53–61.

11. Наумов Б. Н. Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972. 544 с.

12. Якубович В. А. Абсолютная неустойчивость нелинейных систем управления. Системы с нестационарными нелинейностями. Круговой критерий // *Автоматика и телемеханика*. 1971. № 6. С. 25–34.

13. Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 619–624.

Synthesis of a Fuzzy Controller According to the Degree of Stability of the Control System

Y. A. Bykovtsev, bykovtsev@mirea.ru,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"MIREA — Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: Bykovtsev Y. A., Graduate Student, Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA — Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: bykovtsev@mirea.ru

Accepted on February 21, 2022

Abstract

The article is devoted to solving the problem of analysis and synthesis of a control system with a fuzzy controller (fuzzy control system) in terms of the degree of stability. As interest in fuzzy control systems grows, various approaches to the study of such systems are being developed more and more actively. One of the most actively developing areas is based on the modification of methods for assessing the stability regions of nonlinear ACS, however, when solving most practical problems, this knowledge is not enough, since the developer needs to provide the required qualitative characteristics of the transient process (and, in particular, the control time). Therefore, the synthesis of fuzzy ACS in terms of the degree of stability seems to be quite constructive, since it allows quite accurately assessing the performance of a fuzzy ACS. The proposed solution is based on the criterion of absolute stability for a system with an approximated nonlinear characteristic of a fuzzy controller, which can be obtained directly on the basis of the Sugeno method. The article develops Yakubovich's circular criterion of absolute stability, modified for a fuzzy control system, using a shifted AFC of the linear part. With this approach, it is possible to obtain a completely constructive solution to the problem of synthesizing the parameters of a fuzzy controller in the frequency domain. On the example of fuzzy control systems with static and astatic linear parts, the features of the application of the developed approach are shown and methods for synthesizing the parameters of a fuzzy controller are proposed. The analysis of the influence of individual components of the nonlinear transformation on the quality of the transient process is carried out, and on the basis of this a number of practical recommendations are given for correcting the fuzzy controller settings that provide the required performance.

Keywords: degree of stability, fuzzy controller, absolute stability, circular criterion, Sugeno fuzzy model

For citation:

Bykovtsev Y. A. Synthesis of a Fuzzy Controller According to the Degree of Stability of the Control System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 295–301.

DOI: 10.17587/mau.23.295-301

References

1. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control, Physica-Verlag Heidelberg, 2001, 728 p.

2. Jantzen J. Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach, John Wiley & Sons, 2013, 352 p.

3. Tanaka K., Sano M. On the concepts of regulator and observer of fuzzy control systems, *Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference*, 1994, vol. 2, pp. 767–772.

4. Choi H. H., Jung J. Discrete-time fuzzy speed regulator design for PM synchronous motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 600–607.

5. Makarov I. M., Lokhin V. M. Synthesis automation and training of intelligent automatic control systems, Moscow, Nauka, 2009, 227 p. (in Russian).

6. Kluska J., Żabiński T. PID-like adaptive fuzzy controller design based on absolute stability criterion, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 523–533.

7. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S. Stability of intelligent automatic control systems, *Informacionnye tekhnologii. Prilozhenie*, 2013, no. 2, 31 p. (in Russian).

8. Shubladze A. M. Methods for the synthesis of control systems are approaching the degree of stability, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1980, no. 1, pp. 28–37 (in Russian).

9. Azimi S. M., Naghizadeh R. A., Kian A. R. Optimal controller design for interconnected power networks with predetermined degree of stability, *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3165–3175.

10. Litvinov N. D. The method of location of the roots of the characteristic polynomial, which provides the given degree of stability and oscillation of the system, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1995, no. 4, pp. 53–61 (in Russian).

11. Naumov B. N. Theory of nonlinear automatic systems. Frequency methods, Moscow, Nauka, 1972, 544 p. (in Russian).

12. Yakubovich V. A. Absolute instability of nonlinear control systems. Systems with nonstationary nonlinearities. Circular criterion, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1971, no. 6, pp. 25–34.

13. Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 619–624.

С. И. Суятинов, канд. техн. наук, доц., ssi@bmstu.ru,
Т. И. Булдакова, д-р техн. наук, проф., buldakova@bmstu.ru,
Ю. А. Вишневская, аспирант, vishne-yulya@yandex.ru,
МГТУ имени Н. Э. Баумана, г. Москва

Синергетическая модель ситуационной осведомленности человека-оператора в эргатических системах управления подвижными объектами

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования эргатических систем управления подвижными объектами, в которых важная роль отводится человеку-оператору. Эффективность функционирования таких систем в значительной мере зависит от состояния человека-оператора и, в первую очередь, от его ситуационной осведомленности. Недостаточная или неадекватная осведомленность оператора о ситуации в подобных системах является одним из основных факторов несчастных случаев, связанных с человеческой ошибкой. Поэтому актуальной является задача создания моделей профессиональной деятельности человека-оператора, включая модели его ситуационной осведомленности. Показано, что в основе ситуационной осведомленности лежат ментальные модели человека-оператора. Их адекватность зависит от многих субъективных характеристик (факторов), свойственных человеку, например, от его интеллекта, психического состояния, накопленного опыта. Математическая формализация позволит уменьшить субъективную составляющую в формировании ситуационной осведомленности. Отмечено, что важными свойствами ситуационной осведомленности человека-оператора являются ассоциативность и ранжирование информации в зависимости от контекста решаемой задачи. Поэтому ситуационная осведомленность обеспечивает восприятие текущей ситуации и позволяет принимать правильные решения в ответ на те или иные угрозы. Приведены уровни реализации ситуационной осведомленности у человека-оператора. Особенность первого уровня состоит в необходимости совместной обработки большого объема разнородной информации в целях выявления значимых фактов и критической информации о внешних объектах. Задачей второго уровня является формирование целостной картины ситуации, что основано на имеющихся знаниях и предшествующем опыте. Третий, самый высокий, уровень понимания ситуации основывается на способности человека прогнозировать действия подвижных объектов и последствия этих действий. Предложено формировать модель ситуационной осведомленности на основе синергетического подхода Хакена. Как и большинство других интеллектуальных систем, синергетическая модель Хакена включает процессы обучения и распознавания. Дано описание процесса распознавания критической ситуации с помощью обученной синергетической модели. Отмечено значение параметра внимания, который характеризует важность конкретной характеристики состояния управляемого объекта в эргатической системе. Исследованы ассоциативные свойства синергетической модели и ее способность ранжирования исходной информации в процессе анализа угроз при управлении вертолетом.

Ключевые слова: эргатическая система, ситуационная осведомленность, ситуационная модель, синергетика, распознавание ситуации, параметр внимания

Введение

Среди множества сложных систем особое место занимает класс эргатических систем, которые с развитием технических средств все больше превращаются из систем контроля в системы управления, где человек-оператор (ЧО) занимает доминирующее положение. В настоящее время подобные системы "человек—среда—машина" находят широкое применение во многих областях, включая авиацию, управление воздушным движением, судоходство, здравоохранение, реагирование на чрезвычайные ситуации, управление атомными электростанциями и др. При этом наиболее сложными при проектировании и ответственными при эксплуатации являются эргатические системы управления (ЭСУ) подвижными объектами [1–3]. Это объясняется особой ролью ЧО в недопущении критических режимов функционирования подобных объектов. Более того, недостаточная или неадекватная осведомленность ЧО о ситуации является одним из основных факторов несчастных случаев, связанных с человеческой ошибкой.

В связи с этим одна из важнейших проблем разработки высокоэффективных ЭСУ подвижными объектами заключается в оптимальном распределении функций между ЧО и техническими средствами с учетом психофизиологических возможностей человека [4–6]. Для ее решения требуются модели профессиональной деятельности ЧО, включающие модели его ситуационной осведомленности.

Под ситуационной осведомленностью (СО) будем понимать способность ЧО воспринимать разнородную информацию об окружающей среде, анализировать ее, выделять ключевые моменты и прогнозировать их влияние на выполнение тех или иных задач [7–9]. В основе этой способности лежат внутренние ментальные модели человека, сформированные на основании полученных знаний и предшествующего опыта. В связи с усложнением решаемых задач от ЧО требуется совершенствовать свои способности в овладении СО [10–13].

В настоящее время осмыслить сложную ситуацию помогают системы поддержки принятия решения. В основе их работы лежат базы

знаний типовых ситуаций, наполнение которых выполняется экспертами на основе собственной интуиции и имеющегося практического опыта [14–17]. Однако основными ограничениями экспертного подхода являются субъективизм и деградация текущих знаний в условиях изменчивой обстановки.

Поэтому необходимы новые подходы к формированию ситуационной модели как основы формализованного представления СО в ЭСУ подвижными объектами [18, 19].

Уровни реализации ситуационной осведомленности

В ЭСУ подвижными объектами СО человека-оператора имеет иерархическую структуру и представляется как результат анализа имеющейся внешней информации и оценки ситуации [20, 21]. Обычно выделяют три уровня СО:

- восприятие разнородной информации и выделение критических факторов в окружающей среде;
- понимание значения этих факторов в контексте реализации заданных целей управления;
- прогнозирование развития ситуации и возможных последствий.

Сначала на первом уровне выполняется совместная обработка большого объема разнородной информации, чтобы выявить значимые факты и критическую информацию о внешних объектах.

Затем на втором уровне у ЧО формируется целостная картина ситуации, включая понимание значимости действующих объектов и событий в контексте поставленной цели или решаемой задачи. Такое понимание ситуации основано на имеющихся знаниях и предшествующем опыте, т. е. на ментальных моделях ЧО.

Отличительной особенностью этих двух уровней является уникальная способность человека ранжировать исходную информацию по ее значимости в контексте решаемой задачи. Здесь следует отметить, что результат ранжирования информации зависит не только от имеющегося опыта, но и от текущего психологического состояния человека [9, 22, 23].

Третий, самый высокий уровень понимания ситуации ЧО основывается на его способности прогнозировать действия объектов и последствия этих действий. Эта способность достигается за счет понимания ситуации, знания состояния и динамики развития (поведения) элементов внешней среды.

Ясное понимание ситуации основывается на четком выявлении элементов, которые определяют, что необходимо воспринимать, понимать и проецировать на будущее. Эта интегрированная картина формирует основную

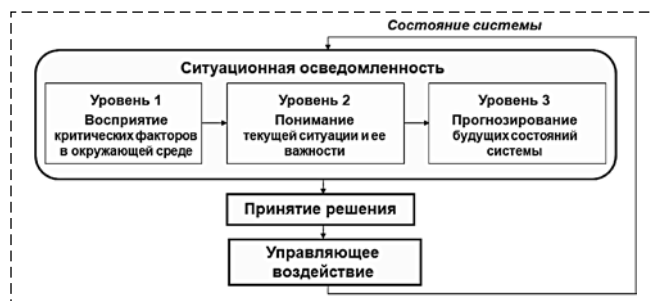


Рис. 1. Ситуационная осведомленность как этап процесса управления

Fig. 1. Situational awareness as a stage in control process

организующую функцию, которая определяет принятие решений и действия (рис. 1).

На практике опытный ЧО имеет внутреннее представление о системе, с которой он работает, — ментальную модель [24–26]. Хорошо развитая ментальная модель ЧО обеспечивает:

- а) знание соответствующих элементов системы, которые могут быть использованы для акцентирования внимания и классификации информации в процессе восприятия;
- б) средство интеграции элементов для формирования понимания их значения;
- в) механизм проецирования будущих состояний системы на основе ее текущего состояния и понимания ее динамики.

Во время активного принятия решений восприятие человеком-оператором текущего состояния системы может быть сопоставлено с соответствующими схемами в памяти, которые отображают прототипные ситуации, или состояния модели системы. Эти прототипные ситуации обеспечивают ассоциативную классификацию и понимание ситуации, а также прогноз того, что может произойти в будущем [27].

Основным преимуществом наличия этих механизмов является то, что текущая ситуация не может быть точно такой же, как та, с которой человек-оператор сталкивался ранее. Процесс согласования (распознавания образов) может быть почти мгновенным из-за превосходящих способностей человека сопоставлять шаблоны.

Когда человек обладает достаточно полной и хорошо структурированной ментальной моделью поведения в определенных ситуациях, он обеспечит:

- а) динамическое направление внимания к критическим сигналам окружающей среды;
- б) ожидания относительно будущих состояний окружающей среды (включая то, что ожидать, а также то, чего не следует ожидать) на основе проекционных механизмов модели;
- в) прямую одношаговую связь между признанными классификациями ситуаций и типичными действиями, обеспечивающими быстрое принятие решений.

Таким образом, принципиально важными свойствами СО являются:

— ассоциативность, т. е. способность формировать целостное представление о ситуации по ее фрагментам;

— ранжирование информации в зависимости от контекста решаемой задачи.

Поэтому модель СО должна отражать эти свойства.

Формирование модели ситуационной осведомленности на основе синергетического подхода Хакена

Свойством ассоциативности обладают некоторые нейронные сети, например, сеть Хопфилда [28, 29]. Основным недостатком сети Хопфилда при распознавании является наличие ложных образов, что совершенно недопустимо при распознавании ситуации в эргатических системах. Кроме того, хотя ассоциативные сети помогают формировать целостное представление о ситуации по неполной информации, однако не могут использоваться как модели СО, так как при их обучении не выполняется ранжирование информации.

В связи с этим представляется перспективным использование синергетической теории Хакена при формировании модели СО. Как и в большинстве других интеллектуальных систем, синергетическая модель Хакена включает процессы обучения и распознавания [30–32].

В процессе обучения формируется потенциальная функция E в n -мерном пространстве со множеством областей притяжения (аттракторов). Указанная функция определяет структуру поля распределения потенциалов. Особенностью структуры потенциального поля является множество локальных минимумов, координаты которых определяют эталон, при этом глобальный минимум отсутствует.

Процесс распознавания ситуации по вектору признаков q описывается дифференциальным уравнением $\dot{X} = -\partial E / \partial X$ и сводится к его решению при заданных начальных условиях $X(0) = X_0$. Эти начальные условия представляют исходный образ распознаваемой ситуации, а решение — образ эталонной ситуации V .

Хакен обосновал представление потенциальной функции в форме:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \lambda_k (X^+ V_k)^2 + \frac{B+C}{4} \left(\sum_{k=1}^M (X^+ V_k)^2 \right)^2 - \frac{B}{4} \sum_{k=1}^M (X^+ V_k)^4.$$

Здесь X^+ является присоединенным вектором, который удовлетворяет уравнению

$$X^+ V_k = V_k^+ X, \quad k = 1, \dots, M,$$

где M — число эталонов.

По Хакену, динамическая система для распознавания и классификации ситуации на основе зафиксированного вектора признаков X имеет следующий вид:

$$\dot{X} = \sum_{k=1}^M \lambda_k (V_k^+ X) V_k - B \sum_{k' \neq k} \sum_{k \neq k'} (V_k^+ X)^2 (V_k^+ X) V_k - C (X^+ X) X, \quad (1)$$

где B и C — постоянные; λ_k — параметр внимания k -го эталонного образа. Образ может быть распознан, если его параметр внимания λ_k положителен, а скорость сходимости распознавания образов контролируется с помощью λ_k , B и C .

Таким образом, процесс распознавания исходного образа (паттерна) состоит в следующем: для данного тестового паттерна X_0 динамический процесс, представленный системой (1), переводит исходное неизвестное состояние $X(0) = X_0$ через промежуточные состояния $X(t)$ в один из эталонных паттернов-состояний V_k , т. е. $X_0 \rightarrow X(t) \rightarrow V_k, 1 \leq k \leq M$.

Исходный ситуационный вектор состояния отличается от своего прототипа (эталона) и может содержать только его фрагменты, но в силу свойств потенциальной функции E прототип будет восстановлен полностью. Так реализуется свойство ассоциативности.

Параметр внимания λ_k влияет на форму аттрактора, делая его склоны либо более пологими, либо более крутыми. Это позволяет выделять более значимую в данном контексте информацию. Таким образом, задавая априори разные значения параметра внимания для различных значений k , можно осуществить ранжирование информации по ее значимости для данной задачи. Поэтому, в отличие от ассоциативных нейронных сетей, синергетическая модель обладает свойством ранжирования данных.

Предложенная модель Хакена позволяет не только восстановить образ (ситуацию) по ее фрагменту, но и решить задачу классификации.

Используя замену переменной $p_k = V_k^+ X$ в (1), Хакен перешел к уравнению

$$\frac{dp_k(t)}{dt} = \lambda_k p_k - B p_k \sum_{i \neq k} p_i^2 - C p_k \sum_{i=1}^M p_i^2. \quad (2)$$

Переменная $p_k = V_k^+ X$ получила название "параметр порядка".

Уравнение (2) используется для классификации образов. Для текущего тестируемого вектора X_0 вычисляется его параметр порядка

$p_k(0) = V_k^+ X_0$. Здесь V_k^+ — сопряженный вектор. Значение $p_k(0)$ является начальным условием для решения уравнения (2). Исходный образ ближе к k -му эталону V_k , если полученное решение p_k имеет максимальное значение.

Пример применения синергетической модели

Важной частью управления современными летательными аппаратами является СО ЧО, и для достижения успешных результатов в авиации требуется наличие высокого уровня СО. Чтобы выполнять полеты в динамичной летной обстановке, летный экипаж должен не только знать, как управлять воздушным судном и надлежащей тактикой, процедурами и правилами полета, но также должен иметь точную и актуальную картину состояния самолета и окружающей среды [19, 20, 33].

В качестве примера оценим ассоциативные свойства синергетической модели и ее способность ранжирования исходной информации в процессе анализа угроз при управлении вертолетом.

При выполнении полета могут возникать угрозы, влияющие на качество выполнения полетного задания. Эти угрозы разделим на три категории:

- угрозы, влияющие на качество выполнения задания (категория 1);
- угрозы целостности вертолета, которые характеризуются временем, достаточным для осмысления ситуации экипажем (категория 2);
- угрозы целостности вертолета, которые характеризуются временем, недостаточным для осмысления ситуации экипажем (категория 3).

Каждой категории соответствует свой эталонный вектор.

Введем характеристики состояния (ситуационной осведомленности) (см. таблицу). В таблице также приведены эталонные векторы. Векторы-прототипы выбраны экспертами исходя из их опыта и логики здравого смысла.

Определим категорию угроз, задаваемую ситуационным вектором X_0 .

Первоначально примем все параметры внимания равными единице. Затем для текущего тестируемого вектора $X_0 = [-1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ вычислим его параметры порядка: $p_1 = -1,2472$; $p_2 = 1,3416$; $p_3 = 1,2472$. При равных значениях параметров внимания можно классифицировать текущую ситуацию по значениям параметров порядка для каждого эталона (фактически, по начальным условиям, без расчета переходных процессов).

Второй параметр порядка имеет максимальное значение, следовательно, тестируемый вектор X_0 соответствует классу, который определяет эталон V_2 . Таким образом, текущая ситуация, задаваемая вектором X_0 , соответствует второй категории.

Проверим этот вывод, построив графики переходных процессов. Для этого решим систему уравнений (2) при $M = 3$, $B = C = 1$. При заданных параметрах получим систему трех уравнений:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_1 - p_1^3 - 2p_1(p_2^2 + p_3^2);$$

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_2 p_2 - p_2^3 - 2p_2(p_1^2 + p_3^2);$$

$$\frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda_3 p_3 - p_3^3 - 2p_3(p_1^2 + p_2^2).$$

Результаты исследования синергетической модели и графики переходных процессов подтверждают полученный вывод (рис. 2). Здесь по оси ординат отложены текущие значения параметров порядка p , а по оси абсцисс — текущее время t .

Теперь определим влияние параметра внимания на результат идентификации ситуации. Параметр внимания характеризует важность конкретной характеристики состояния. В данном случае он определяется оценкой времени, которое необходимо экипажу для принятия решения, а также значимостью возможных последствий при возникновении этой характеристики. Поэтому будем считать, что чем меньше времени отводится экипажу на принятие решения в сложной ситуации, тем больше должен быть параметр внимания.

Характеристики состояния и векторы-прототипы
State characteristics and prototype vectors

Категория	Характеристики состояния	Текущий вектор X_0	Эталон-вектор V_1	Эталон-вектор V_2	Эталон-вектор V_3
1	Отказ двигателя	−1	−1	−1	1
2	Перебои в работе	1	−1	1	−1
3	Стуки в двигателе	−1	1	1	−1
4	Недопустимая температура масла в редукторе	1	−1	−1	1
5	Отказ основного привода управления рулевыми плоскостями	1	−1	1	1
6	Отказ резервного привода управления рулевыми плоскостями	1	−1	−1	1
7	Отказ системы спутниковой навигации	1	1	1	1
8	Отказ системы инерциальной навигации	1	−1	−1	1
9	Недостаточная видимость	1	−1	−1	1

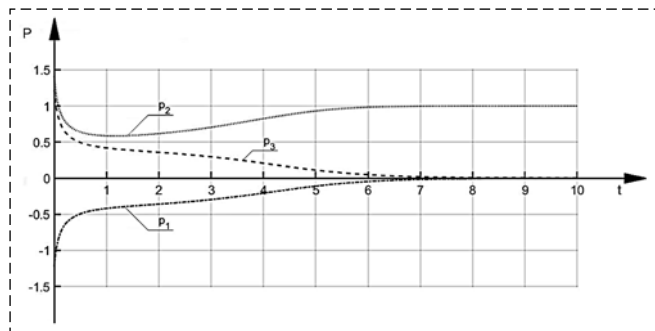


Рис. 2. Решение системы дифференциальных уравнений с равными значениями параметров внимания

Fig. 2. Solving a system of differential equations with equal values of attention parameters

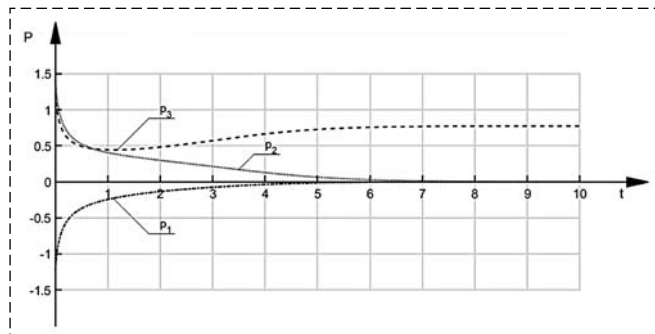


Рис. 3. Решение системы дифференциальных уравнений с заданными значениями параметров внимания

Fig. 3. Solving a system of differential equations with given values of attention parameters

Рассмотрим ситуацию, когда заданы следующие значения параметров внимания: $\lambda_1 = 0,1$; $\lambda_2 = 0,3$; $\lambda_3 = 0,6$. Переходные процессы установления параметров порядка, получаемые в процессе решения уравнения (2), представлены на рис. 3.

На графиках переходных процессов видно, что одна кривая стремится к 1, а две другие стремятся к 0. Поэтому с учетом параметров внимания в процессе идентификации текущего вектора X_0 ситуация будет классифицирована как категория 3.

Во втором случае, при разных значениях параметров внимания, синергетическая модель продемонстрировала свойство ранжирования информации.

Заключение

СО обеспечивает адекватное восприятие текущей ситуации и позволяет принимать правильные решения в ответ на те или иные угрозы. В основе СО лежат ментальные модели человека-оператора. Их адекватность зависит от многих субъективных характеристик (факторов), свойственных человеку, например, его интеллекта, психического состояния. Математическая формализация СО позволяет уменьшить субъективную составляющую в формировании

СО. В качестве математической основы формирования математической модели СО использован синергетический вычислитель Хакена.

На примере показана возможность классификации ситуационного вектора по степени возможных угроз выполнению задания, а также эффект ранжирования информации по ее значимости в конкретной задаче.

Список литературы

1. Nosov P. S., Palamarchuk I. V., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Nahrybelnyi Ya. A., Nosova H. V. Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. 2020. N. 1 (97). P. 58–69.
2. Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Современные проблемы автоматизации и интеллектуализации эргатических систем управления подвижными объектами // Интеллектуальные системы управления. Под ред. С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2010. С. 85–95.
3. Тырва В. О. Автоматизация эргатической системы "человек-машина" на основе применения в ней антропоморфного управления // Автоматизация в промышленности. 2021. № 2. С. 3–7.
4. Сергеев С. Ф. Нейроадаптивные биоморфные интерфейсы в эргатических системах: проблемы и решения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 599–605.
5. Тырва В. О., Саушев А. В. О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах "человек-машина" // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 5. С. 274–281. doi: 10.17587/mau.21.274-281.
6. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Интеллектуальная поддержка человека-оператора в эргатических системах управления // Матер. 2-й междунар. конф. "Эрго-2016. Человеческий фактор в сложных технических системах и средах". Санкт-Петербург, 2016. С. 117–124.
7. Buldakova T. I., Suyatinov S. I. Assessment of the State of Production System Components for Digital Twins Technology // Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 259. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_20.
8. Меркулов В. И., Михеев В. А., Липатов А. А., Чернов В. С. Особенности интеграции и комплексной обработки информации в системах ситуационной осведомленности воздушного базирования // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 3–21.
9. Buldakova T. I., Sokolova A. V. Structuring Information about the State of the Cyber-Physical System Operator // International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). Moscow, Russia. 2020. P. 1–5. doi: 10.1109/Inforino48376.2020.9111654.
10. Жанказиев С. В., Воробьев А. И., Воробьева Т. В., Ковешников А. А. Обеспечение ситуационной осведомленности для повышения надежности движения высокоавтоматизированных транспортных средств // Наука и техника в дорожной отрасли. 2020. № 4 (94). С. 27–29.
11. Шибанов Г. П. Оценка степени обученности оператора для управления летательным аппаратом // Мехатроника, автоматизация и управление. 2017. Т. 18, № 7. С. 492–495.
12. Anokhin A., Burov S., Parygin D., Rent V., Sadovnikova N., Finogeev A. Development of Scenarios for Modeling the Behavior of People in an Urban Environment // Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Studies in Systems, Decision and Control. 2021. Vol. 333. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_9.
13. Большаков А. А., Виштак О. В., Фролов Д. А. Методика и алгоритмы управления интерактивной компьютерной обучающей системой для подготовки персонала атомной станции // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6-2. С. 234–240.

14. Boukhayma K., El Manouar A. Evaluating decision support systems // 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA). 2015. P. 404–408. doi: 10.1109/ISDA.2015.7489263.
15. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 563–578.
16. Mygal V. P., Mygal G. V., Iliashenko O. Intelligent Decision Support — Cognitive Aspects // Digital Transformation, Cyber Security and Resilience of Modern Societies. Studies in Big Data. 2021. Vol. 84. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65722-2_25.
17. Dzhalogov A. S., Buldakova T. I., Proletarsky A. Socio-Economic Decision Support Module by Unstructured Data // Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia. 2020. P. 1931–1934. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039086.
18. Endsley M. R. The divergence of objective and subjective situation awareness: A meta-analysis // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. 2020. Vol. 14(1). P. 34–53.
19. Lundberg J. Situation awareness systems, states and processes: a holistic framework // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2015. Vol. 16 (5). P. 447–473. DOI: 10.1080/1463922X.2015.1008601.
20. Fedunov B. E., Simkina N. D. The conceptual model of anthropocentric objects for the onboard tactical intelligence systems // Proc. of the 19-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2017), Germany, Baden-Baden. October 8–10, 2017. Vol. 1. P. 211–214.
21. Федунев Б. Е. Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно советующих экспертных системах типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 6. С. 90–102.
22. Suyatinov S. I. Bernstein's Theory of Levels and Its Application for Assessing the Human Operator State // Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT-2019. Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 199. P. 298–312. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_25.
23. Булдакова Т. И., Соколова А. В., Халайджиджи А. К. Мониторинг состояния человека-оператора киберфизической

системы // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2020. № 10. С. 20–27.

24. Beggiano M., Krems J. F. The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information // Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2013. Vol. 18. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.12.006>.
25. Endsley M. R. Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models // Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings. 2000. Vol. 44 (1). P. 61–64. <https://doi.org/10.1177/154193120004400117>.
26. Gauffroy C., Barrouillet P. Heuristic and analytic processes in mental models for conditionals: An integrative developmental theory // Developmental Review. 2009. Vol. 29, Iss. 4. P. 249–282. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.09.002>.
27. Suyatinov S. Biological Principles of Intellectual Motion Control: Models and Implementation Options // XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia. 2019. P. 187–191. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976497.
28. Litinskii L. B., Malsagov M. Y. The Hopfield-like neural network with governed ground state // BMC Neuroscience. 2013. Vol. 14. P. 257. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-S1-P257>.
29. Hillar C. J., Tran N. M. Robust Exponential Memory in Hopfield Networks // The Journal of Mathematical Neuroscience. 2018. Vol. 8 (1). <https://doi.org/10.1186/s13408-017-0056-2>.
30. Haken H. Synergetic Computers and Cognition—A Top-Down Approach to Neural Nets. Springer, Berlin, Heidelberg. 2004. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10182-7>.
31. Ma X., Jiao L. An Effective Learning Algorithm of Synergetic Neural Network // Advances in Neural Networks — Lecture Notes in Computer Science. Vol. 3173. Springer, Berlin, Heidelberg. 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-540-28647-9_44.
32. Singh R., Yang H., Dalziel B., Asarnow D., Murad W., Foote D., Gormley M., Stillman J., Fisher S. Towards human-computer synergetic analysis of large-scale biological data // BMC Bioinformatics. 2013. Vol. 14 (S10). <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-S14-S10>.
33. Большаков А. А., Кулик А. А. Исследование комплексной системы управления летательного аппарата вертолетного типа при отказах бортового оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 9. С. 568–575.

Synergetic Model of Situational Awareness of a Human Operator in Ergatic Control Systems of Mobile Objects

S. I. Suyatinov, e-mail: ssi@bmstu.ru, T. I. Buldakova, e-mail: buldakova@bmstu.ru,
Yu. A. Vishnevskaya, e-mail: vishne-yulya@yandex.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Buldakova T. I.**, PhD., Faculty of Computer Science and Control Systems of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: buldakova@bmstu.ru

Accepted on March 01, 2022

Abstract

At present, researches of ergatic control systems for moving objects, in which an important role is assigned to the human operator, are of particular relevance. The effectiveness of the functioning of such systems largely depends on the state of the human operator and, first of all, on his situational awareness. Insufficient or inadequate awareness of the operator about the situation in such systems is one of the main factors of accidents associated with human error. Therefore, the task of creating models of professional activity of a human operator, including models of his situational awareness, is urgent. It is shown that situational awareness is based on mental models of a human operator. Their adequacy depends on many subjective characteristics (factors) peculiar to a person, for example, his intelligence, mental state, accumulated experience. Mathematical formalization will reduce the subjective component in the formation of situational awareness. It is noted that important properties of situational awareness of the human operator are associativity and ranking of information depending on the context of the problem being solved. Therefore, situational awareness provides perception of the current situation and allows you to make the right decisions in response to certain threats. The levels of implementation of situational awareness in a human operator are given. A feature of the first level is the need for joint processing of a large amount of heterogeneous information in order to identify significant facts and critical information about external objects. The task of the second level is to form a holistic picture of the situation, which is based on existing knowledge and previous experience. The third, highest level of understanding of the situation is based on the ability of a person to predict the actions of moving objects and the consequences of these actions. It is proposed to form a model of situational awareness based on Haken's synergetic approach. Like most other intelligent systems, the synergetic Haken's model includes learning and recognition processes. A description of the process of recognizing a critical situation using a trained synergetic model is given. The value of the attention parameter, which characterizes the importance of a specific characteristic of the state of the controlled object in the ergatic system, is noted. The associative properties of the synergetic model and its ability to rank the initial information in the process of threat analysis during helicopter control are investigated.

Keywords: ergatic system, situational awareness, situational model, synergetics, situation recognition, attention parameter

References

1. Nosov P. S., Palamarchuk I. V., Zinchenko S. M., Popovich I. S., Nahrybelnyi Ya. A., Nosova H. V. Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport, *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*, 2020, no. 1 (97), pp. 58–69.
2. Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B. Modern problems of automation and intellectualization of ergatic control systems for mobile objects, *Intellectual'nye sistemy upravleniya*, Moscow, Mashinostroenie, 2010, pp. 85–95 (in Russian).
3. Tyrva V. O. Automation of the ergatic system "man-machine" based on the application of anthropomorphic control in it, *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, 2021, no. 2, pp. 3–7 (in Russian).
4. Sergeev S. F. Neuroadaptive biomorphic interfaces in ergatic systems: problems and solutions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 599–605 (in Russian).
5. Tyrva V. O., Saushev A. V. On the implementation of combined control actions on an object in man-machine systems, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 5, pp. 274–281, doi: 10.17587/mau.21.274-281 (in Russian).
6. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Intellectual support of a human operator in ergatic control systems, *Materialy 2-j mezhdunar. konf. "Ergo-2016. Chelovecheskij faktor v slozhnykh tekhnicheskikh sistemah i sredah"*, Saint-Petersburg, 2016, pp. 117–124 (in Russian).
7. Buldakova T. I., Suyatinov S. I. Assessment of the State of Production System Components for Digital Twins Technology, *Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 259, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-32579-4_20.
8. Merkulov V. I., Mikhnev V. A., Lipatov A. A., Chernov V. S. Features of integration and complex information processing in air-based situational awareness systems, *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2016, no. 6, pp. 3–21 (in Russian).
9. Buldakova T. I., Sokolova A. V. Structuring Information about the State of the Cyber-Physical System Operator, *International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*, Moscow, Russia, 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/Inforino48376.2020.9111654.
10. Zhankaziev S. V., Vorobyov A. I., Vorobyova T. V., Koveshnikov A. A. Providing situational awareness to improve the reliability of the movement of highly automated vehicles, *Nauka i tekhnika v dorozhnoi ottrasli*, 2020, no. 4 (94), pp. 27–29 (in Russian).
11. Shibanov G. P. Assessment of the degree of operator training for controlling an aircraft, *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 492–495 (in Russian).
12. Anokhin A., Burov S., Parygin D., Rent V., Sadovnikova N., Finogeev A. Development of Scenarios for Modeling the Behavior of People in an Urban Environment, *Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, vol. 333, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_9.
13. Bolshakov A. A., Vishtak O. V., Frolov D. A. Methods and algorithms for controlling an interactive computer training system for training nuclear power plant personnel, *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, no. 6-2, pp. 234–240 (in Russian).
14. Boukhayma K., ElManouar A. Evaluating decision support systems, *15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, 2015, pp. 404–408, doi: 10.1109/ISDA.2015.7489263.
15. Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational approach in problems of automation of control of technical objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 563–578 (in Russian).
16. V. P., Mygal G. V., Illiashenko O. Intelligent Decision Support — Cognitive Aspects, *Digital Transformation, Cyber Security and Resilience of Modern Societies. Studies in Big Data*, 2021, vol. 84, Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-65722-2_25.
17. Dzhahalov A. S., Buldakova T. I., Proletarsky A. Socio-Economic Decision Support Module by Unstructured Data, *Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1931–1934. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039086.
18. Endsley M. R. The divergence of objective and subjective situation awareness: A meta-analysis, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2020, vol. 14(1), pp. 34–53.
19. Lundberg J. Situation awareness systems, states and processes: a holistic framework, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2015, vol. 16 (5), pp. 447–473, doi: 10.1080/1463922X.2015.1008601.
20. Fedunov B. E., Simkina N. D. The conceptual model of anthropocentric objects for the onboard tactical intelligence systems, *Proc. of the 19-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2017)*, Germany, Baden-Baden. October 8-10, 2017, vol. 1, pp. 211–214.
21. Fedunov B. E. Intellectual agents in the knowledge bases of on-board operational consulting expert systems of typical situations of functioning of an anthropocentric object // *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2019, no. 6, pp. 90–102 (in Russian).
22. Suyatinov S. I. Bernstein's Theory of Levels and Its Application for Assessing the Human Operator State, *Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT-2019. Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, vol. 199, pp. 298–312, https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_25.
23. Buldakova T. I., Sokolova A. V., Khalaidzhi A. K. Monitoring the state of a human operator of a cyber-physical system, *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2: Informatsionnye protsessy i sistemy*, 2020, no. 10, pp. 20–27 (in Russian).
24. Beggiano M., Krems J. F. The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2013, vol. 18, pp. 47–57, https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.12.006.
25. Endsley M. R. Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models, *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 2000, vol. 44(1), pp. 61–64, https://doi.org/10.1177/154193120004400117.
26. Gauffroy C., Barrouillet P. Heuristic and analytic processes in mental models for conditionals: An integrative developmental theory, *Developmental Review*, 2009, vol. 29, iss. 4, pp. 249–282, https://doi.org/10.1016/j.dr.2009.09.002.
27. Suyatinov S. Biological Principles of Intellectual Motion Control: Models and Implementation Options, *XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*, Samara, Russia, 2019, pp. 187–191, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976497.
28. Litinskii L. B., Malsagov M. Y. The Hopfield-like neural network with governed ground state, *BMC Neuroscience*, 2013, vol. 14, pp. 257, https://doi.org/10.1186/1471-2202-14-S1-P257.
29. Hillar C. J., Tran N. M. Robust Exponential Memory in Hopfield Networks, *The Journal of Mathematical Neuroscience*, 2018, vol. 8 (1), https://doi.org/10.1186/s13408-017-0056-2.
30. Haken H. Synergetic Computers and Cognition—A Top-Down Approach to Neural Nets, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, https://doi.org/10.1007/978-3-662-10182-7.
31. Ma X., Jiao L. An Effective Learning Algorithm of Synergetic Neural Network, *Advances in Neural Networks — Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3173, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, https://doi.org/10.1007/978-3-540-28647-9_44.
32. Singh R., Yang H., Dalziel B., Asarnow D., Murad W., Foote D., Gormley M., Stillman J., Fisher S. Towards human-computer synergetic analysis of large-scale biological data, *BMC Bioinformatics*, 2013, vol. 14 (S10), https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-S14-S10.
33. Bolshakov A. A., Kulik A. A. Investigation of the integrated control system of a helicopter-type aircraft in case of on-board equipment failures, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 9, pp. 568–575 (in Russian).

А. Н. Сочнев, канд. техн. наук, зав. каф. РИТК ПИ СФУ, asochnev@sfu-kras.ru,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Оптимизационно-имитационный подход к оперативному управлению дискретным производством

Описан подход к решению задачи управления дискретным производством на основе эталонной имитационной модели. В качестве объекта исследования выбрана производственная система, представленная типичным технологическим оборудованием. Имитационная модель использует математический аппарат временных сетей Петри.

Сформирован и апробирован метод автоматизированного получения готовых к использованию моделей производства. В основу метода положена идея синтеза общей модели производственного процесса из моделей типовых технологических процессов. В практике применения сетей Петри сложность разработки, последующей интерпретации моделей, а следовательно, и внесения изменений — факторы, значимо сдерживающие их практическое использование.

Предложен новый способ влияния на критерий оптимальности через задание различных отношений инцидентов в сети Петри. В структуре матрицы инцидентов выделены неизменяемая и изменяемая части. Использован способ задания структуры изменяемой части через вектор параметров, что позволило использовать метаэвристический алгоритм поиска ее наилучшей структуры. Сформулирована задача оптимального планирования производства, определенная для описанного выше подхода. Биоинспирированный алгоритм прыгающих лягушек адаптирован к поиску наилучшей для заданного критерия оптимальности структуры сети. Изменения указанного алгоритма позволили сократить число шагов поиска и работать с параметрами дискретного типа. В процессе решения использован наиболее популярный критерий оптимальности. Полученные теоретические результаты находятся в рамках оптимизационно-имитационного подхода и являются его логическим развитием.

Разработанный подход к решению задачи оптимального управления производством развивает теорию сетей Петри, делает ее более пригодной для моделирования сложных систем с разветвленной структурой и большим числом взаимных связей. На основе разработанных теоретических положений представлен тестовый пример, характеризующий эффект от их применения. Определены рекомендации по практическому использованию предложенного подхода в смысле минимизации времени принятия управленческих решений с требуемой точностью.

Ключевые слова: сеть Петри, оптимизационно-имитационный подход, оперативно-календарное планирование, метаэвристические алгоритмы, алгоритм прыгающих лягушек

Введение

Результаты анализа структуры и характеристик позволяют классифицировать дискретное производство как сложную иерархическую систему с многовариантным поведением, обусловленным переменной структурой процессов [1, 2]. Отмеченное обстоятельство приводит к пониманию сложности задачи оптимального управления такой системой [3, 4]. Управляющее воздействие для подобных систем определяется, как правило, на основе экспериментов с имитационной моделью производства [5–7]. При этом точность и обоснованность анализа и управления зависят от того, насколько разработанные методы моделирования и сами модели адекватно представляют реальные процессы. Приведенные выше факторы обу-

словливают актуальность исследований в области математического моделирования производственных систем [8, 9].

Подход к решению этой задачи на основе экспериментов с имитационной сетевой моделью Петри эмпирически доказал свою состоятельность, но в то же время были выявлены и некоторые его недостатки [8, 10]. Для современных систем управления производством характерны высокие требования к скорости разработки и внесения изменений в модель. Быстро изменяющиеся рыночные условия также затрудняют своевременное и точное определение оптимального управляющего воздействия. Также появляются новые способы организации производства, например матричного типа, для которых задачи управления еще более усложняются [11, 12].

Принимая во внимание специфику дискретного производства как объекта управления, поиск оптимального управляющего воздействия рационально осуществлять на основе идей оптимизационно-имитационного подхода, предполагающего серию экспериментов с имитационной моделью [13, 14]. Предложено определять в ходе экспериментов структуру матрицы инцидентов поисковой процедурой в соответствии с заданной целевой функцией. Назначение ресурсов при планировании трансформировано в процесс формирования отношений инцидентности между операциями и ресурсами.

Задача управления дискретным производством

Дискретное производство представляется в виде объекта управления (рис. 1), характеризующегося следующими основными компонентами: вектором входных переменных x , выражающим номенклатуру и ассортимент (число) входных ингредиентов, вектором выходных переменных y , определяющим результат функционирования дискретного производства — объем изделий товарного выпуска, вектором переменных состояния z , отражающим число продуктов производства, имеющихся в распоряжении дискретной производственной системы на текущий момент управления, вектором возмущений e , вектором переменных управления u .

Процесс функционирования дискретного производства отображается математической моделью следующего вида [5]:

$$\begin{cases} z[k+1] = g(z[k], u[k], e[k]), \\ y[k] = f(x[k], u[k], e[k], z[k]), \end{cases}$$

где $g(z, u, e)$, $f(x, u, e, z)$ — нелинейные функции; k — номер интервала управления.

Процесс управления в производственной системе (ПС) является дискретным. Протекание производственного процесса (ПП) от момента k и далее зависит только от состояния ПС в этот момент времени и последующих значений управ-

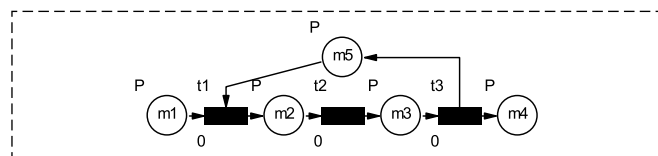


Рис. 1. Модель (А) токарной обработки (одна установка заготовки)

Fig. 1. Model (A) of turning processing (one workpiece set)

ления и возмущений и не зависит от того, как ПС пришла в это состояние, т. е. от предыстории ПП. Таким образом, состояние ПС в момент $k + 1$ зависит только от ее состояния в k -й момент времени, действия управления и возмущения.

Основная задача системы управления дискретным производством состоит в реализации управления, направленного на организацию и последующее выполнение производственной программы u , обеспечивающей достижение определенной цели дискретного производства — приведение темпов производства продукции y в соответствие с запросами конечного потребителя.

Процесс функционирования системы управления дискретным производством сводится к реализации алгоритма управления, представляемого в виде последовательного выполнения фаз синтеза управления (предварительного планирования) дискретным производством, анализа его результатов и поддержания хода процесса в соответствии с запланированным. В данной работе рассмотрен подход к решению первой из перечисленных задач.

Задача предварительного планирования производства состоит в формировании расписания работы ПС. Ее решение требует как временного упорядочения процесса, так и пространственного. Временное упорядочение выражается в определении сроков начала и окончания выполнения работ, а пространственное — в назначении работ на определенное технологическое оборудование. Формально задача календарного планирования ставится следующим образом. Пусть на технологическом участке требуется обработать n деталей (или их партий). Задаются технологические маршруты. Совокупность чисел $P = \{t_{ij}^0\}$, удовлетворяющих ограничениям, называется календарным планом. Решение задачи календарного планирования заключается в отыскании неизвестных величин $\{t_{ij}^0\}$. Задача оптимального планирования заключается в отыскании такого плана P^* , который экстремизирует критерий эффективности и удовлетворяет ограничениям. В качестве критерия эффективности в рассматриваемом ниже примере используется минимизация времени выпуска заданного объема продукции

$$T(P) = t_{last}^k \rightarrow \min_{P \in \Omega_P},$$

где t_{last}^k — момент завершения последней планируемой операции; Ω_P — множество допустимых планов.

Таблица 1
Table 1

Плановое задание на период
Planned task for the period

№ изделия	Тип процесса	Тип модели
1, 2, 4, 9, 10, 12, 15	Токарный (тип 1)	<i>A</i>
6, 7, 11	Токарный (тип 2)	<i>B</i>
8, 13, 14	Токарно-фрезерный (тип 1)	<i>C</i>
3, 5	Токарно-фрезерный (тип 2)	<i>D</i>

Задача планирования решается на примере исследуемого роботизированного гибкого производственного комплекса (ГПК). В его структуре присутствуют токарные и фрезерные станки и предусмотрено выполнение технологических процессов токарной, фрезерной и токарно-фрезерной обработки. Определен набор технологических процессов и параметры операций для изделий, введены модельные обозначения технологических процессов (*A*, *B*, *C*, *D*) (табл. 1).

Важная проблема практических задач планирования — сложность аналитического определения целевой функции. Часто задача определяется как многокритериальная. В таких случаях фактическое значение показателей эффективности плана целесообразно определять по результату имитационного эксперимента с моделью производства. В качестве основы для формирования имитационной математической модели выбраны временные сети Петри.

Синтез сетевой модели системы

Структура модели на основе сети Петри определяется матрицей инцидентности позиций и переходов. Матрицу инцидентности предлагается синтезировать в частично автоматизированном режиме. Общая модель составляется из модульных частей, представляющих отдельные виды производственных структур для типичных технологических маршрутов [15, 16]. В целях создания таких моделей выполнен предварительный анализ производственного задания и группировка изделий по типу.

Технологические процессы, описанные выше, могут быть представлены структурами следующих видов. Они обозначены по порядку следо-

вания: модель *A*, модель *B*, модель *C* и модель *D* (рис. 1, 2, 3 и 4).

Интерпретация элементов сети Петри: *t1* — операция установки заготовки, *t2* — токарная обработка, *t3* — переустановка, *t4* — токарная обработка, *t5* — перенос на фрезерный станок, *t6* — фрезерная обработка, *t7* — перенос готового изделия в накопитель, *m1* — заготовки в накопителе, *m2* — заготовки до обработки 1, *m3* — изделия после обработки 1, *m4* — изделия до токарной обработки 2, *m5* — изделия после токарной обработки 2, *m6* — изделия до фрезерной обработки, *m7* — изделия после фрезерной обработки, *m8* — готовые изделия в накопителе, *m9* — занятость токарного станка, *m10* — занятость фрезерного станка.

Для представляемой ПС матрица инцидентностей синтезируется из матриц моделей, приведенных выше, и имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} B1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B1 \end{bmatrix},$$

где *B1*, *B2*, *B3*, *B4* — матрицы инцидентностей моделей *A*, *B*, *C*, *D* соответственно.

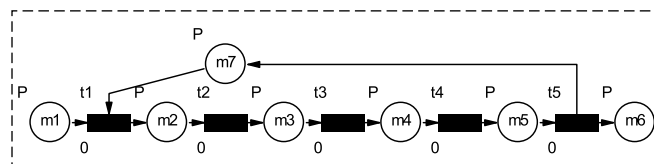


Рис. 2. Модель (B) токарной обработки (две установки заготовки)

Fig. 2. Model (B) of turning processing (two workpiece sets)

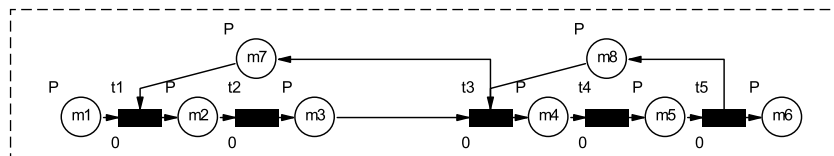


Рис. 3. Модель (C) токарно-фрезерной обработки (одна установка)

Fig. 3. Model (C) turning-milling processing (one set)

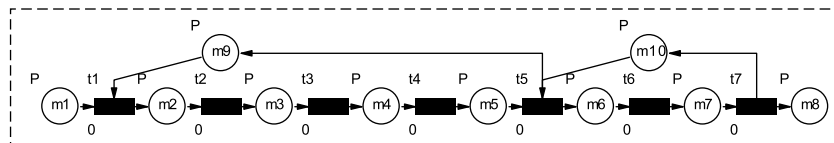


Рис. 4. Модель (D) токарно-фрезерной обработки (две установки)

Fig. 4. Model (D) turning-milling processing (two sets)

Вариативность производственных планов определяется выбором оборудования для выполнения операций и выбором изделий из множества в очереди. Множество ресурсов (оборудования) в сетевой модели ПС представляется множеством дополнительных позиций. Назначение конкретного оборудования для выполнения определенных операций выражается в формировании соответствующей матрицы инцидентности позиций (ресурсов) и переходов сетевой модели. Таким образом, в общей матрице инцидентий сетевой модели формируются две части. Первая из них определяется в соответствии с описанным выше методом и является структурно детерминированной. Вторая часть, задающая использование ресурсов, является вариативной, и ее структура может быть определена для их конкретного распределения по операциям. Формально, структура общей матрицы инцидентности, состоящей из двух частей, имеет вид

$$D = \begin{bmatrix} B \\ R \end{bmatrix},$$

где B — детерминированная часть, R — вариативная часть.

В соответствии с представленной идеей структурирования модели выполнены следующие действия.

1. В модель процесса добавлены позиции, моделирующие занятость используемых агрегатов — станков и роботов. Общая модель представлена на рис. 5. Интерпретация элементов модели: m101 — робот-манипулятор № 1, m102 — токарный станок № 1, m103 — робот-манипулятор № 2, m104 — токарный станок № 2, m105 — обрабатывающий центр. Пронумерованы модели технологических процессов для деталей из таблицы (№ 1, 2, ..., 15).

2. Для определения структуры матрицы инцидентий с ресурсами, зависимой от вектора параметров, заданы области допустимых значений функции и независимых переменных. В рассматриваемой системе вариативность процессов обеспечивается дублирующим оборудованием — токарными станками, следовательно, разные технологические маршруты могут быть не

для всех деталей. В общей номенклатуре девять деталей могут иметь разные маршруты. Следовательно, размерность вектора параметров равна девяти. Диапазон значений параметров, очевидно, определяется числом вариантов технологических маршрутов. В данной простой системе для каждого перечисленного типа изделия число маршрутов равно двум. Делается допущение, что маршрут устанавливается для всех деталей данного типа одинаковым и не изменяется в процессе моделирования. Таким образом, параметризация может осуществляться вектором следующего вида:

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9],$$

$$x_i \in \{0, 1\}, i = 1, 9.$$

Функция, формирующая структуру матрицы инцидентий, может быть получена из описания возможных технологических маршрутов. В структуре матрицы инцидентий выделяются элементы, соответствующие отдельным технологическим агрегатам, и связываются с пози-

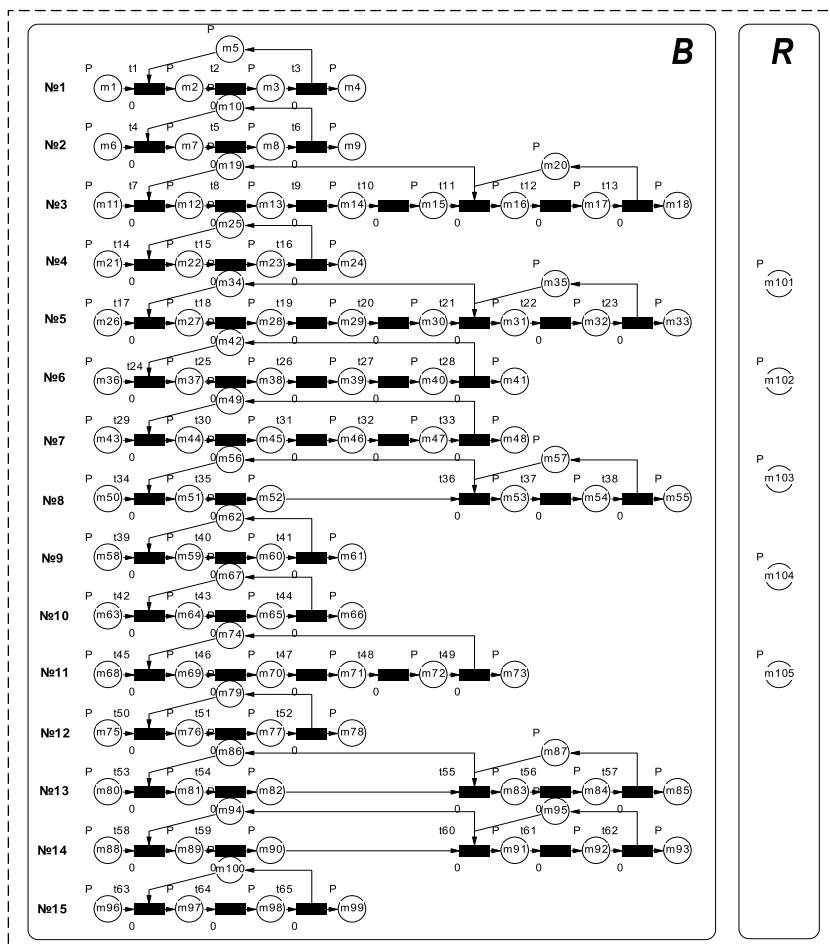


Рис. 5. Общий вид сетевой модели
Fig. 5. General view of the net model

циями ресурсов. Например, технологический процесс для токарной обработки (модель A) включает две транспортные операции (установка, снятие) и одну технологическую (обработку). Обозначим TA функцию связи ресурса с транспортными операциями, функцию для связи с операцией обработки — MA . Тогда можно определить функции $TA(x_i)$ и $MA(x_i)$ от параметра x_i и задать значения этих функций. В рассматриваемом примере введен дополнительный вектор параметров y : $y_i = \text{not}(x_i)$, $i = 1, n$, для удобства определения структуры матрицы R .

Интерпретация приведенных ниже значений: нулевые значения элементов вектора говорят о выборе другого ресурса, ненулевые — о выборе данного. Аналогичным образом определяют значения функций TB, MB, TC, MC, TD, MD :

$$TA(0) = [0\ 0\ 0],\ TA(1) = [1\ 0\ 1],$$

$$MA(0) = [0\ 0\ 0],\ MA(1) = [0\ 1\ 0],$$

$$TB(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ TB(1) = [1\ 0\ 1\ 0\ 1],$$

$$MB(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ MB(1) = [0\ 1\ 0\ 1\ 0],$$

$$TC(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ TC(1) = [1\ 0\ 1\ 0\ 1],$$

$$MC(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ MC(1) = [0\ 1\ 0\ 0\ 0],$$

$$MC(2) = [0\ 0\ 0\ 1\ 0],$$

$$MD(0) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0],\ MD(1) = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0],$$

$$MD(2) = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0].$$

После этого может быть задана структурная связь каждой позиции, моделирующей ресурсы, с элементами модели процессов. В матрице R функционально эти связи заданы построчно:

3. Формирование набора векторов-параметров x . В рассматриваемом примере вектор сформирован случайным образом. При наличии априорной информации о системе начальные значения выбираются на основе ее анализа.

4. В качестве целевой функции могут быть выбраны следующие критерии: минимизация времени процесса, максимизация загрузки оборудования, минимизация количества используемых ресурсов, максимизация выпуска продукции и т. д. Ранее был выбран первый критерий как наиболее типичный. В рамках описываемого подхода целевая функция определяется от матрицы инцидентности операций и ресурсов R :

$$Q(R) \rightarrow \max_{R \in R_T}(\min),$$

где R_T — множество допустимых значений R , определяемое технологическими и иными ограничениями системы. В целях формализации процесса поиска решения значения элементов матрицы R были заданы функционально через вектор параметров x , определяющий вариант реализации процесса с конкретными ресурсами. Соответственно, определены зависимости $R = R(x)$ и $Q = f(R(x))$.

5. Проведены двадцать экспериментов при выбранных параметрах. Определено значение целевой функции. Полученные значения далее интерпретируются как первоначальная популяция (табл. 2).

$$R101(x) = [TA(x_1)\ TA(x_2)\ TD(1)\ TA(x_3)\ TD(1)\ TB(x_4)\ TB(x_5)\ TC(1)\ TA(x_6)\ TA(x_7)\ TB(1)\ TA(x_8)\ TC(1)\ TC(1)\ TA(x_9)]$$

$$R102(x) = [MA(x_1)\ MA(x_2)\ MD(1)\ MA(x_3)\ MD(1)\ MB(x_4)\ MB(x_5)\ MC(1)\ MA(x_6)\ MA(x_7)\ MB(1)\ MA(x_8)\ MC(1)\ MC(1)\ MA(x_9)]$$

$$R103(x) = [TA(y_1)\ TA(y_2)\ TD(1)\ TA(y_3)\ TD(1)\ TB(y_4)\ TB(y_5)\ TC(1)\ TA(y_6)\ TA(y_7)\ TB(1)\ TA(y_8)\ TC(1)\ TC(1)\ TA(y_9)]$$

$$R104(x) = [MA(y_1)\ MA(y_2)\ MD(2)\ MA(y_3)\ MD(2)\ MB(y_4)\ MB(y_5)\ MC(2)\ MA(y_6)\ MA(y_7)\ MB(1)\ MA(y_8)\ MC(2)\ MC(2)\ MA(y_9)]$$

$$R105(x) = [MA(y_1)\ MA(y_2)\ MD(3)\ MA(y_3)\ MD(3)\ MB(1)\ MB(1)\ MC(3)\ MA(y_6)\ MA(y_7)\ MB(1)\ MA(y_8)\ MC(3)\ MC(3)\ MA(y_9)]$$

Таблица 2
Table 2

Результаты имитационных экспериментов
Results of simulation experiments

№ эксперимента	x	$T(P)$	№ эксперимента	x	$T(P)$
1	1 1 1 1 1 0 1 1 1	406	8	1 1 1 0 0 0 0 1 1	407
3	0 1 0 1 1 1 1 0 0	381	13	1 1 1 1 1 1 1 0 0	377
...	...	...	...	...	...
7	0 0 1 0 1 0 1 0 0	574	20	0 1 1 0 1 0 1 1 0	446

Решение оптимизационной задачи реализовано методом, имитирующим поведение лягушек в поисках пищи (*Shuffled Frog-Leaping Algorithm*) [17, 18]. Основная идея подобных методов — это взаимодействие между собой множества агентов системы "роевого" интеллекта, которые обмениваются информацией в целях приближения к оптимальному решению. Реализуется переход от популяции к популяции, которые представляют множество лягушек, образующих несколько непересекающихся множеств, называемых стаями. Внутри стай проводится улучшение целевой функции путем изменения положения наихудшей лягушки по следующему правилу:

$$x_{-}[k + 1] = x_{-}[k] + rand \cdot (x_{+}[k] - x_{-}[k]),$$

где $x_{-}[k]$ — наихудшее значение в стае; $x_{+}[k]$ — наилучшее значение в стае; $rand$ — случайный вектор, элементы которого равномерно распределены на отрезке $[0; 1]$; $\cdot$ — поэлементное произведение векторов по Адамару. Сравнение проводится на основе критерия $T(P)$. Если полученное решение $x_{-}[k + 1]$ лучше, чем наихудшее $x_{-}[k]$, то оно заменяет его. Если нет, то находится новое положение наихудшей лягушки по представленной выше формуле, где вместо наилучшего решения внутри стаи используется наилучшее среди всех лягушек в популяции. После завершения локального поиска деление популяции на стаи проводится заново. Процедура поиска завершается при достижении максимального числа итераций.

Особенности задачи календарного планирования производства потребовали доработки метода прыгающих лягушек в направлении сокращения числа шагов поиска. Были выполнены следующие модификации используемого метода оптимизации в сравнении с его описанием, представленным в литературе [19, 20].

1. Скорректировано правило изменения положения наихудшей лягушки:

$$x_{-}[k + 1] = x_{-}[k] + \Delta x; \\ \Delta x_i = rand[0; 1], \text{ если } i \in I,$$

где $rand[0; 1]$ — генератор случайных чисел с двоичным выходом $\{0; 1\}$; I — множество изменяемых компонент вектора x .

Изменения проведены, поскольку поиск отношений инцидентности элементов сети Петри — задача дискретного типа. Кратности дуг

сети могут быть только целыми числами. Важная особенность рассматриваемого примера состоит еще и в двоичном характере изменения компонент вектора x .

2. Множество изменяемых компонент содержит элементы вектора x , изменяемые на текущем шаге. Предложено изменять скорость приближения к экстремуму целевой функции, меняя число пересчитываемых элементов вектора x от n до 1, что будет уже частично соответствовать покоординатному движению.

3. Для уменьшения числа опытов особи не делятся на мемплексы (стаи), оптимизационная процедура реализована в рамках одной группы. Основания такого решения — предполагаемое небольшое пространство поиска для решаемой задачи, одна точка глобального оптимума, высокие требования к скорости и низкие — к точности решения. Для более сложных производственных систем рекомендуется оставить деление на стаи, поскольку это является эффективным механизмом глобального поиска. Поэтому, в общем случае, процедура является метаэвристической.

4. Периодически, также в целях ускорения поиска, выполняется сокращение числа особей в стае. Формальным признаком возможного сокращения является появление большого числа лягушек с близкими (не минимальными) значениями целевой функции.

5. Изменен критерий остановки поиска. Поиск останавливается при локализации всех лягушек в некоторой локальной области. Формально такая локализация обнаруживается сильным уменьшением дисперсии значений $Q(x)$ относительно среднего значения.

Ниже представлены результаты решения описанной задачи для тестового примера. Значения векторов параметров и соответствующих значений целевой функции сведены в таблицу (табл. 3). Для краткости записи убраны векторы, которые не изменяются на текущем шаге. Фоном на каждом шаге отмечены изменяемые (наихудшие) особи. В процессе решения проведено сокращение популяции. Граница, по которой отсеяны векторы, выбрана с целью оставить не более половины стаи. На финальной стадии поиска отмечается концентрация в некоторой области, которая, очевидно, содержит локальный или глобальный экстремум. В качестве результата решения выбирается седьмой вектор параметров, формирующий наилучшее значение критерия оптимальности.

При практическом применении предложенного подхода на финальном этапе осуществля-

Промежуточные и конечные состояния параметров
Intermediate and final parameter states

Шаг № 1			Шаг № 10			Конечное состояние		
№ эксп.	x	$T(P)$	№ эксп.	x	$T(P)$	№ эксп.	x	$T(P)$
7	1 1 1 0 1 1 1 0 1	356	2	0 1 0 0 1 1 0 0 0	455	1	1 0 1 1 1 0 1 1 1	357
9	0 0 1 0 1 0 1 1 0	530	18	1 1 1 1 1 1 0 0 0	369	7	0 1 1 1 1 0 0 1 1	342

ются анализ полученного решения, его интерпретация, анализ устойчивости к изменениям, а также другие исследования, выходящие за рамки данной работы.

Заключение

По итогам работы получены следующие научно-практические результаты.

1. Предложено синтезировать сетевую модель производственного процесса в частично автоматизированном режиме с использованием набора моделей типичных технологических процессов.

2. Апробирован способ исследования и оптимизации процессов на основе поиска структуры матрицы инцидентов сети Петри. Определен вариант параметризации отношений инцидентов в сети.

3. Выявлены возможности применения в рамках решения описанной задачи оптимизационно-имитационного подхода. Исследован алгоритм прыгающих лягушек для поиска отношений инцидентов в сети, оптимизирующих выбранный критерий. Модифицированы параметры выбранного поискового алгоритма оптимизации с учетом особенностей задачи.

4. Сформулированные идеи апробированы на примере типичной машиностроительной производственной системы.

Перечисленные выше результаты в совокупности образуют применимый подход к созданию системы оптимального управления производством. Обобщения по эффективности решения задачи планирования для разных по размеру и конфигурации систем можно будет сделать после дополнительных экспериментов. Узким местом при увеличении масштабов системы может стать вопрос роста числа экспериментов и соответствующее увеличение вычислительных затрат и, как итог, времени решения задачи.

Список литературы

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.

2. Дальниченко И. А., Мясников В. И., Четвериков В. Н. Автоматизированные системы управления предприятиями. М.: Машиностроение, 1984. 360 с.

3. Горнев В. Ф., Емельянов В. В., Овсянников М. В. Оперативное управление в ГПС. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.

4. Смоляр Л. И. Оперативно-календарное планирование (модели и методы). М.: Экономика, 1979. 136 с.

5. Воробьев С. А. Планирование и управление дискретным производством на основе временных сетей Петри с переменной нагрузкой: Дис. канд. техн. наук: 05.13.14. Красноярск, Изд-во КГТУ, 2002. 149 с.

6. Макаров И. М., Рахманкулов В. З., Назаретов В. М. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. Кн. 3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 159 с.

7. Сочнев А. Н. Сетевые модели в системах управления производством: монография. Красноярск: СФУ, 2013. 157 с.

8. Зайцев Д. А. Решение задач оперативного управления дискретным производством на основе сетевых моделей Петри: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев: Институт кибернетики им. В. М. Глушкова, 1991. 12 с.

9. Корнеев А. М., Наги А. М. Моделирование сложных технологических процессов с использованием сетей Петри // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9-3. С. 410–414.

10. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.

11. Greschke P., Schonemann M., Thiede S., Herrmann C. Matrix structures for high volumes and flexibility in production systems // Procedia CIRP 17. 2014. P. 160–165.

12. Feldkamp N., Bergmann S., Straburger S. Modelling and Simulation of Modular Production Systems // ASIM-Conference Simulation in Production and Logistics. 2019. P. 391–401.

13. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1985. 173 с.

14. Хоботов Е. Н. Оптимизационно-имитационный подход к моделированию сложных систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 1. С. 111–117.

15. Feldmann K., Colombo A. W. Monitoring of flexible production systems using high-level Petri net specifications // Control Engineering Practice. 1999. N. 7. P. 1449–1466.

16. Basile F., Carbone C., Chiacchio P. An approach to enforce disjunction of GMECs on controlled Petri nets // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man. and Cybernetics. 2003. P. 1852–1859.

17. Narimani M. R. A New Modified Shuffle Frog Leaping Algorithm for Non-Smooth Economic Dispath // World Applied Sciences Journal. 2011. P. 803–814.

18. Орловская Н. М. Анализ эффективности биоинспирированных методов глобальной оптимизации // Электронный журнал "Труды МАИ". 2020. № 73. С. 1–22.

19. Vakil Baghmisheh M. T., Madani K., Navarbf A. A discrete shuffled frog optimization algorithm // Artificial Intelligence Review. 2011. Vol. 36. P. 267–284.

20. Farsangi M., Barati M. Solving unit commitment problem by a binary shuffled frog leaping algorithm // IET Generation Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8, N. 6. P. 1050–1060.

Simulation Petri Net Model in the Tasks of Operational Control of Discrete Production

A. N. Sochnev, asochnev@sfu-kras.ru,

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Corresponding author: Sochnev A. N., Cand. of Tech. Sci., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: asochnev@sfu-kras.ru

Accepted on March 04, 2022

Abstract

The presented article describes the approach to solving the task of discrete production control based on the reference imitation model. A discrete production system, represented by typical technological equipment, was chosen as the object of research. The simulation model uses the mathematical apparatus of temporary Petri nets. A method for automated synthesis of ready-to-use production models has been formed and tested. The method is based on the idea of synthesizing a production process model from models of typical technological processes. In the practice of applying Petri nets, the complexity of developing, subsequent interpretation of models, and, consequently, making changes are factors that significantly hinder their practical use. A new way of influencing the criterion is proposed by setting different incidence ratios in the Petri net. In the structure of the incidence matrix, the invariable and variable parts are distinguished. A method for specifying the structure of the variable part through the vector of parameters is described, which made it possible to use a metaheuristic algorithm for finding its best structure. The problem of optimal production planning defined for the approach described above is formulated. The bioinspired algorithm of jumping frogs is adapted to the search for the best network structure for a given optimality criterion. Changes in the specified algorithm made it possible to reduce the number of search steps, as well as work with discrete type parameters. In the process of solving, the most popular optimality criterion was used. The obtained theoretical results are within the framework of the optimization-simulation approach and are its logical development. The developed approach to solving the problem of optimal production control develops the theory of Petri nets, makes it more suitable for modeling complex systems with a branched structure and a large number of interconnections. On the basis of the developed theoretical provisions, a test example is presented that characterizes the effect of their application. Recommendations for the practical use of the proposed approach in the sense of minimizing the time for making managerial decisions with the required accuracy are determined.

Keywords: Petri net, optimization-simulation approach, operational scheduling, metaheuristic algorithms, shuffled frog-leaping algorithm

For citation:

Sochnev A. N. Simulation Petri Net Model in the Tasks of Operational Control of Discrete Production, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 309–316.

DOI: 10.17587/mau.23.309-316

References

1. Mesarovic M., Mako D., Takahara I. Theory of hierarchical multilevel systems, Moscow, Mir, 1973, 344 p. (in Russian).
2. Dalnichenko I. A., Myasnikov V. I., Chetverikov V. N. Automated control systems for enterprises, Moscow, Mashinostroyeniye, 1984, 360 p. (in Russian).
3. Gornev V. F., Emelyanov V. V., Ovsyannikov M. V. Operational management in FMS, Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, 256 p. (in Russian).
4. Smolyar L. I. Operational scheduling: (Models and methods), Moscow, Ekonomika, 1979, 136 p. (in Russian).
5. Vorobyov S. A. Planning and control of discrete production based on temporary Petri nets with variable load: Dis. cand. tech. Sciences: 05.13.14, Krasnoyarsk, Publishing House of KSTU, 2002, 149 p. (in Russian).
6. Makarov I. M., Rakhmankulov V. Z., Nazaretov V. M. Robotics and flexible automated production: In 9 books. Book. 3. Management of robotic systems and flexible automated production, Moscow, Vyssh. school, 1986, 159 p. (in Russian).
7. Sochnev A. N. Net models in production control systems (monograph), Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2014, 162 p. (in Russian).
8. Zaitsev D. A. Solution of tasks of operational control of discrete production based on Petri net models: Abstract of the thesis. dis. cand. tech. sciences, Kiev, Institut kibernetiki im. V. M. Glushkova, 1991, 12 p. (in Russian).
9. Korneev A. M., Nagi A. M. Modeling of complex technological processes using Petri nets, *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, no. 9-3, pp. 410–414 (in Russian).
10. Kotov V. E. Petri Nets, Moscow, Nauka, 1984, 160 p. (in Russian).
11. Greschke P., Schonemann M., Thiede S., Herrmann C. Matrix structures for high volumes and flexibility in production systems, *Procedia CIRP* 17, 2014, pp. 160–165.
12. Feldkamp N., Bergmann S., Straburger S. Modeling and Simulation of Modular Production Systems, *ASIM-Conference Simulation in Production and Logistics*, 2019, pp. 391–401.
13. Tsvirkun A. D., Akinfiyev V. K., Filippov V. A. Simulation modeling in problems of synthesizing the structure of complex systems, Moscow, Nauka, 1985, 173 p. (in Russian).
14. Khobotov E. N. Optimization and simulation approach to modeling complex systems, *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1996, no. 1, pp. 111–117 (in Russian).
15. Feldmann K., Colombo A. W. Monitoring of flexible production systems using high-level Petri net specifications, *Control Engineering Practice*, 1999, no. 7, pp. 1449–1466.
16. Basile F., Carbone C., Chiacchio P. An approach to enforce disjunction of GMECs on controlled Petri nets, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man. and Cybernetics*, 2003, pp. 1852–1859.
17. Narimani M. R. A New Modified Shuffle Frog Leaping Algorithm for Non-Smooth Economic Dispatch, *World Applied Sciences Journal*, 2011, no. 1, pp. 803–814.
18. Orlovskaya N. M. Analysis of the effectiveness of bioinspired methods of global optimization, *Elektronnyy zhurnal "Trudy MAI"*, 2020, no. 73, pp. 1–22 (in Russian).
19. Vakil Baghmisheh M. T., Madani K., Navarbah A. A discrete shuffled frog optimization algorithm, *Artificial Intelligence Review*, 2011, vol. 36, pp. 267–284.
20. Farsangi M., Barati M. Solving unit commitment problem by a binary shuffled frog leaping algorithm, *IET Generation Transmission & Distribution*, 2014, vol. 8, no. 6, pp. 1050–1060.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., devyatis@dvo.ru,

А. В. Шурыгин, мл. науч. сотр., ashurygin@dvo.ru,

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Математические модели и алгоритмы бортовой мультиагентной интегрированной системы определения движения

Изложены методологические и технологические аспекты численного синтеза интегрированной многофункциональной системы усвоения навигационной информации, доставляемой разнесенными в пространстве бортовыми датчиками спутникового позиционирования подвижного объекта (технологической платформы, ТП) и совмещенными с ними трехкомпонентными измерителями вектора кажущегося ускорения — 3D-ньютонотрами. Современные методы и практики систем наблюдения и управления движущимися объектами существенно ориентированы на глубокие математически формализованные представления этой предметной области. В свете таких представлений и следует рассматривать содержание статьи о проблеме комплементарности двух различных по физической природе видов информации и о перспективах такого исследования.

Основные модельные математически формализованные конструкции следуют фундаментальной калмановской парадигме "состояние—измерение" и, таким образом, ориентированы на численное решение некорректно поставленных обратных задач определения движения ТП как твердого тела с возможностью работы в реальном времени. В качестве базовой системы координат выбрана эллипсоидальная система, дополнительно к которой введены иные координатные системы, с неизбежной необходимостью обуславливающие решения задач благодаря сформированной совокупности соответствующих транслирующих преобразований. Представлены алгоритмы вычисления кинематических параметров траектории и пространственной ориентации ТП, характеристик каузальности движения — сил и моментов, а также предложены численные решения проблем мобильной векторной гравиметрии и гравитационной градиентометрии. Разработан алгоритм имитации бортового мультипозиционирования, обуславливающий проведение верифицирующих вычислительных экспериментов; их некоторые результаты приведены в статье. Программный комплекс, реализующий рассматриваемые алгоритмы имитации и решения, разработан на языке Julia и позволяет получать полный набор данных состояния всех систем в любой дискретной временной точке имитатора.

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, некорректная задача, обратная задача, инерциальная информация, спутниковое позиционирование, интегрированная система, параметры движения, эллипсоидальная система координат, Julia

Введение

Современная методология теории и практики систем наблюдения и управления движущимися объектами существенно ориентирована на глубокие математически формализованные представления этой предметной области. В немалой степени этому способствуют заметно ускоряющиеся темпы развития средств вычислительной техники и информационных технологий в целом. Высокая степень технологической восприимчивости ими формализованных образов в различных областях научной и практической деятельности социума породила и составляет суть семантического ядра таких появившихся в двадцатом веке понятий-терминов, как "робот" и "искусственный интеллект".

В контексте именно этих представлений и следует рассматривать содержание и, главное, перспективы исследований, излагаемых в настоящей статье, посвященной проблеме целеполагающей комплементарности двух существенно различающихся по физической природе видов информации о движении, а именно — инерциальной, доставляемой 3D-датчиками кажущегося ускорения (3D-ньютонотрами [1—3]), и позиционной, доставляемой навигационными спутниковыми системами, например, типа ГЛОНАСС [4—6]. Особо необходимо отметить бортовую мультиагентность обоих видов информации.

Целеполагающая онтология исследования, результаты которого изложены в настоящей статье, характеризуется следующими компонентами:

- объект исследования — мультиагентная бортовая система интегрирования спутниковой и инерциальной информации, доставляемой датчиками указанных выше типов;
- предмет исследования — аналитические модели, численные методы и многофункциональные алгоритмы интегрированной навигационной системы;
- гипотеза — концептуальная парадигма, положенная в основу методологии решения математически некорректной обратной задачи многократного дифференцирования функции (траектории движения) при дискретно-темпоральном измерении ее значений; концепция мультиагентности как средства достижения многофункциональности;
- цель исследования — разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для многофункциональных интегрированных спутниково-инерциальных систем многоцелевого назначения.

В завершение этого раздела статьи, обращаясь к историческому аспекту, необходимо отметить, что идея применения многопозиционности (мультиагентности) наблюдается при решении разного рода проблем, включая задачи определения движения, и, вообще говоря, не нова, но в контексте вышеизложенного следует отметить работу [2], где она исследована для оценки возможности отказа от гироскопических датчиков угловых скоростей, а также работы [7–9], в которых рассмотрены бортовые системы спутникового позиционирования для оценки параметров пространственной ориентации авиационных и морских объектов, но в существенно ограниченных вариантах постановок задач.

Основные модельные представления

Совокупность физических объектов, рассматриваемая в статье, представлена Землей в качестве планеты Солнечной системы, подвижным объектом как твердым телом, далее называемым технологической платформой (ТП), и многоагентной информационной системой, отождествляемой с $n + 1$ датчиками векторов сил негравитационной природы (3D-ньютометры) и совмещенными с ними датчиками позиционирования навигационной спутниковой системы (например, ГЛОНАСС или GPS), известным об-

разом размещенными на ТП. Переходя соответственно к модельным представлениям, будем следовать концептуальной парадигме математической теории систем Р. Калмана [10, 11] — "состояние—измерение" как парадигме научного познания и практики. Начнем с того, что в том или ином качестве участвует в формировании, а в итоге составляет суть и конкретное наполнение понятия "состояние".

В качестве формы (фигуры) Земли выбирается эллипсоид вращения А. Клеро с параметрами Ф. Н. Красовского. Любая точка поверхности эллипсоида характеризуется тремя радиусами кривизны — $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$, известным образом, что будет показано ниже, зависящими от параметров эллипсоидов, места точки и направления ее перемещения. Примем, что центром эллипсоида является точка его геометрической симметрии — точка O .

Оставаясь в рамках представлений о мире И. Ньютона [1], введем следующую совокупность систем координат:

- геоцентрические — прямоугольную ($O_\zeta = O_{\zeta_1\zeta_2\zeta_3}$, ось O_{ζ_3} направлена по вектору угловой скорости собственного вращения Земли) и комплементарную ей сферическую с координатами

$$\{\varphi, \lambda, r\} = \{\text{широта, долгота, } r = |\zeta|\};$$

- эллипсоидальную — с координатами

$$\{\tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}, \tilde{h}\} = \{\text{широта, долгота, высота над эллипсоидом}\}, \tilde{\lambda} = \lambda;$$

- подвижные ориентированные географически (Восток, Север, Зенит) прямоугольные координатные триэдры $\{o\tilde{x}, o^i\tilde{x}^i, i = \overline{1, n}\}$ и $\{ox, o^i x^i, i = \overline{1, n}\}$ на сетях $\{\tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}\}$ и $\{\varphi, \lambda\}$ соответственно, а также свободно ориентированный жестко связанный с ТП приборный триэдр $ou = ou_1 u_2 u_3$, в осях которого задаются векторы места — $\mathbf{y}^i = (y_1^i, y_2^i, y_3^i)^T$, $i = \overline{1, n}$, элементов мультиагентной системы.

Опираясь теперь на известные базовые положения дифференциальной геометрии, предложенные в работах [2, 12, 13], адаптируем их в целях восприятия указанной выше совокупности координатных систем как целостности, необходимой при последующих за этим разработке и верификации дальнейших модельных представлений и решений.

Прежде всего определим радиусы

$$\begin{aligned}\rho_1^i &= \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}^i)^{1/2}}; \\ \rho_2^i &= \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}^i)^{3/2}}; \\ \rho_3^i &= \left(\frac{\sin^2 \psi^i}{\rho_1^i} + \frac{\cos^2 \psi^i}{\rho_2^i} \right)^{-1}\end{aligned}\quad (1)$$

как радиусы кривизны трех нормальных сечений поверхности эллипсоида в каждой точке $(\tilde{\varphi}^i, \tilde{\lambda}^i)$, $i = 0, n$, а именно: касательно к параллели, меридионального сечения, образующего угол ψ^i (так называемый путевой угол движения, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от оси $o^i \tilde{x}_2^i$ к оси $o^i \tilde{x}_1^i$ триэдра $o^i \tilde{x}^i$), где a и e — значения большой полуоси и эксцентриситета используемой модели земного эллипсоида, причем $e^2 = \frac{(a^2 - b^2)}{a^2}$, b — малая полуось эллипсоида;

соответственно $r_1^i = \rho_1^i + \tilde{h}^i$, $r_2^i = \rho_2^i + \tilde{h}^i$, $r_3^i = \rho_3^i + \tilde{h}^i$ — радиусы кривизны поверхностей, которым принадлежат точки o^i . Заметим, что выражение для ρ_3^i известно как формула Л. Эйлера.

Далее, учитывая (1) и следующие за этим уточнения, приведем наиболее существенные преобразования координат:

$$\begin{aligned}(\tilde{\varphi}^i, \tilde{\lambda}^i, \tilde{h}^i) &\rightarrow (\varsigma_1^i, \varsigma_2^i, \varsigma_3^i): \\ \begin{cases} \varsigma_1^i = r_1^i \cos \tilde{\varphi}^i \cos \lambda^i; \\ \varsigma_2^i = r_1^i \cos \tilde{\varphi}^i \sin \lambda^i; \\ \varsigma_3^i = (\rho_1^i(1 - e^2) + \tilde{h}^i) \sin \tilde{\varphi}^i; \end{cases}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}(\varphi^i, \lambda^i, h^i) &\rightarrow (\varsigma_1^i, \varsigma_2^i, \varsigma_3^i): \\ \begin{cases} \varsigma_1^i = r^i \cos \varphi^i \cos \lambda^i; \\ \varsigma_2^i = r^i \cos \varphi^i \sin \lambda^i; \\ \varsigma_3^i = r^i \sin \varphi^i; \\ r^i = |\varsigma|; \end{cases}\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{x}^i &\rightarrow \varsigma^i: \\ \{\varsigma^i &= \mathbf{B}(\varphi^i, \lambda^i) \mathbf{x}^i = \mathbf{B}^i \mathbf{x}^i,\end{aligned}\quad (4)$$

$$\text{где } \mathbf{B}^i = \begin{pmatrix} -\sin \lambda^i & -\sin \varphi^i \cos \lambda^i & \cos \varphi^i \cos \lambda^i \\ \cos \lambda^i & -\sin \varphi^i \sin \lambda^i & \cos \varphi^i \sin \lambda^i \\ 0 & \cos \varphi^i & \sin \varphi^i \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}\mathbf{x}^i &\rightarrow \tilde{\mathbf{x}}^i: \\ \{\tilde{\mathbf{x}}^i &= \mathbf{C}(\Delta \varphi^i) \mathbf{x}^i = \mathbf{C}^i \mathbf{x}^i,\end{aligned}\quad (5)$$

$$\text{где } \Delta \varphi^i = \tilde{\varphi}^i - \varphi^i; \operatorname{tg} \varphi^i = \left[\left(1 - \frac{\rho_1^i e^2}{r_1^i} \right) \operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i \right],$$

$$\mathbf{C}^i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta \varphi^i & -\sin \Delta \varphi^i \\ 0 & \sin \Delta \varphi^i & \cos \Delta \varphi^i \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}^j &\rightarrow \tilde{\mathbf{x}}^i: \\ \{\tilde{\mathbf{x}}^i &= \mathbf{B}^T(\tilde{\varphi}^j, \lambda^j) \mathbf{B}(\tilde{\varphi}^j, \lambda^j) \tilde{\mathbf{x}}^j = (\tilde{\mathbf{B}}^i)^T \tilde{\mathbf{B}}^j \tilde{\mathbf{x}}^j,\end{aligned}\quad (6)$$

$$\text{где } \tilde{\mathbf{B}}^i = \mathbf{B}(\tilde{\varphi}^i, \lambda^i) = \mathbf{B}(\varphi^i, \lambda^i) \mathbf{C}^T(\Delta \varphi^i) = \mathbf{B}^i (\mathbf{C}^i)^T;$$

$$\begin{aligned}\varsigma^i &\rightarrow \tilde{\mathbf{x}}^i: \\ \tilde{\mathbf{x}}^i &= \mathbf{B}^T(\tilde{\varphi}^i, \lambda^i) \varsigma^i = (\tilde{\mathbf{B}}^i)^T \varsigma^i;\end{aligned}\quad (7)$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}} &\rightarrow \mathbf{y}: \\ \{\mathbf{y} &= \mathbf{A}(\alpha, \beta, \theta) \tilde{\mathbf{x}}^i = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}^i,\end{aligned}\quad (8)$$

$$\text{где } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \theta & \cos \alpha \sin \theta & -\sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \theta - \cos \beta \sin \theta & \sin \alpha \sin \beta \sin \theta + \cos \beta \cos \theta & \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \sin \beta \sin \theta & \sin \alpha \cos \beta \sin \theta - \sin \beta \cos \theta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}\varsigma^i &\rightarrow \mathbf{y}^i: \\ \{\mathbf{y}^i &= \mathbf{A}(\alpha, \beta, \theta) \mathbf{B}^T(\tilde{\varphi}^i, \lambda^i) \varsigma^i = \mathbf{A}(\tilde{\mathbf{B}}^i)^T \varsigma^i.\end{aligned}\quad (9)$$

Уравнения движения

Кинематика, или "геометрия движения" [1]. Отождествим с траекторией движения ТП пространственную кривую, описываемую точкой $o^0 = o$ при движении. Обозначим $\tilde{\mathbf{v}}^i = (\tilde{v}_1^i, \tilde{v}_2^i, \tilde{v}_3^i)^T$, $i = 0, n$, векторы линейных скоростей точек o^i относительно твердой Земли в проекциях на оси подвижных триэдров $o^i \tilde{x}^i$. При движении по криволинейным траекториям имеет место пространственная изменчивость векторов $\tilde{\mathbf{v}}^i$, представляемая их роторами, т. е. векторами $\operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}}^i = \left(\frac{\delta \tilde{v}_3}{\delta x_2} - \frac{\delta \tilde{v}_2}{\delta x_3}, \frac{\delta \tilde{v}_1}{\delta x_3} - \frac{\delta \tilde{v}_3}{\delta x_1}, \frac{\delta \tilde{v}_2}{\delta x_1} - \frac{\delta \tilde{v}_1}{\delta x_2} \right)^T$, векторами вихрей $\tilde{\boldsymbol{\omega}}^i = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \tilde{\mathbf{v}}^i$, т. е. угловыми скоростями вращения триэдров $o^i \tilde{x}^i$, и тензорами завихренности $(\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ks}^i) = e_{kls}(\tilde{\boldsymbol{\omega}}_l^i)$, $k, l, s = \overline{1, 3}$; $i = 0, n$; (e_{kls}) — тензор Леви—Чивита [14]. Компоненты вектора $\tilde{\boldsymbol{\omega}}^i$ определяются следующим образом:

$$\tilde{\omega}_1^i = -\tilde{v}_2^i/r_2^i, \tilde{\omega}_2^i = \tilde{v}_1^i/r_1^i, \tilde{\omega}_3^i = \tilde{v}_1^i \operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i / r_1^i \quad (10)$$

или

$$\tilde{\omega}_1^i = -\dot{\tilde{\varphi}}^i, \tilde{\omega}_2^i = \dot{\tilde{\lambda}}^i \cos \tilde{\varphi}^i, \tilde{\omega}_3^i = \tilde{\omega}_2^i \operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i.$$

Теперь могут быть записаны уравнения траекторий всех точек o^i , $i = \overline{0, n}$. Учитывая их однотипность, ограничимся точкой $o^0 = o$:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\varphi}} &= \tilde{v}_2/[a(1-e^2)/(1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi})^{3/2} + \tilde{h}], \tilde{\varphi}(0); \\ \dot{\tilde{\lambda}} &= \tilde{v}_1/[a/(1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi})^{1/2} + \tilde{h}] \cos \tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}(0); \\ \tilde{h} &= \tilde{h}(t), \tilde{v}_3 = \dot{\tilde{h}}. \end{aligned} \quad (11)$$

В полученных дифференциальных уравнениях переменные $\tilde{v}_1$, $\tilde{v}_2$ и $\tilde{h}(t)$ следует рассматривать в качестве параметров, которые должны быть заданы, если речь идет только об интегрировании уравнений, например, в целях создания генератора траекторий. Другое дело, когда речь идет о темпоральном позиционировании объекта, т. е. параметры $\tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}, \tilde{h}$ измеряются. Тогда уравнения (11) занимают свое место ("состояние") в системе "состояние—измерение" [10], актуализируется задача реконструкции кинематических параметров траектории — координат, скоростей и их производных — и реализуется процедура решения задачи. Последняя, обеспечивающая высокоэффективное качество решения, в условиях конечной точности измерений и вычислений весьма подробно представлена нами в работе [15].

Завершим обсуждение кинематики движения представлением матричного уравнения Пуассона [2], описывающего пространственную эволюцию ТП как твердого тела, отождествляемую с вращением триэдра ou . В нашем случае имеем $\dot{\mathbf{A}} = -\mathbf{P}\mathbf{A}$, где $\mathbf{P}$ — тензор завихренности с сопутствующим вектором $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)^T$, являющимся угловой скоростью вращения триэдра ou относительно триэдра $o\tilde{x}$.

Динамика точки. В кинематике точка рассматривается как чисто геометрический объект. В динамике она наделяется массой, т. е. материализуется, а ее траектория движения обретает свойство причинности (каузальности) и является решением уравнения Ньютона.

Каждая из $n+1$ точек o^i , входящих в бортовую мультиагентную систему, участвует в двух движениях — относительном (к твердой Земле) и переносном, обусловленном собственным вращением Земли с вектором угловой скоро-

сти, направленным вдоль оси $O\zeta_3$, и для каждой из них представимым как $\tilde{\mathbf{u}}^i = (\tilde{u}_1^i, \tilde{u}_2^i, \tilde{u}_3^i)^T$ в триэдре $o^i\tilde{x}^i$, так что:

$$\tilde{u}_1^i = 0, \tilde{u}_2^i = u \cos \tilde{\varphi}^i, \tilde{u}_3^i = u \sin \tilde{\varphi}^i, u = |\mathbf{u}|. \quad (12)$$

Принимая во внимание изложенное выше, вектор $\tilde{\mathbf{V}}^i = (\tilde{V}_1^i, \tilde{V}_2^i, \tilde{V}_3^i)^T$ абсолютной линейной скорости и соответствующий ему тензор вращения $\tilde{\mathbf{\Omega}}^i = (\tilde{\Omega}_{ms}^i)$ определяются своими компонентами в триэдре $o^i\tilde{x}^i$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1^i &= \tilde{v}_1^i + \tilde{u}_2^i r_1^i; \\ \tilde{V}_2^i &= \tilde{v}_2^i; \\ \tilde{V}_3^i &= \tilde{v}_3^i; \\ \tilde{\Omega}_{ms}^i &= e_{mks}(\tilde{\omega}_k^i + u_k^i); \\ i &= \overline{0, n}; \quad m, k, s = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда уравнения Ньютона принимают вид:

$$\frac{d}{dt} \tilde{\mathbf{V}}^i + \tilde{\mathbf{\Omega}}^i \tilde{\mathbf{V}}^i = \tilde{\mathbf{f}}^i + \tilde{\mathbf{g}}^i = \tilde{\mathbf{F}}^i, i = \overline{0, n}, \quad (14)$$

где $\tilde{\mathbf{f}}^i$ — вектор удельных сил негравитационной природы; $\tilde{\mathbf{g}}^i$ — напряженность гравитационного поля.

С учетом (10), (12) и (13) уравнения (14) можно записать в расширенном виде:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{v}}_1^i + \frac{\tilde{v}_1^i}{r_1^i}(\tilde{v}_3^i - \tilde{v}_2^i \operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i) - \tilde{v}_2^i \tilde{u}_3^i \left(1 + \frac{r_1^i}{r_2^i}\right) + \\ + \tilde{v}_3^i \tilde{u}_2^i + \tilde{u}_2^i \dot{r}_1^i = \tilde{g}_1^i + \tilde{f}_1^i = \tilde{F}_1^i; \\ \dot{\tilde{v}}_2^i + \frac{(\tilde{v}_1^i)^2}{r_1^i} \operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i - 2\tilde{v}_1^i \tilde{u}_3^i + \tilde{u}_2^i \tilde{u}_3^i r_1^i = \\ = \tilde{g}_2^i + \tilde{f}_2^i = \tilde{F}_2^i; \\ \dot{\tilde{v}}_3^i - \left(\frac{(\tilde{v}_1^i)^2}{r_1^i} + \frac{(\tilde{v}_2^i)^2}{r_2^i}\right) - 2\tilde{v}_1^i \tilde{u}_2^i - (\tilde{u}_2^i)^2 r_1^i = \\ = \tilde{g}_3^i + \tilde{f}_3^i = \tilde{F}_3^i. \end{aligned} \quad (15)$$

В рассматриваемом здесь нами случае, когда значения всех переменных определены, можно говорить и об определении всех сил — как инерции, описываемой в левых частях уравнений (15), так и действующих сил, т. е. $\{\tilde{\mathbf{F}}^i, i = \overline{0, n}\}$, обуславливающих траекторию движения ТП.

Заметим, что двучлен, выделенный скобками в третьем из уравнений (15), можно свернуть в одночлен, используя формулу Эйлера (11), но только при $h = 0$. Очевидно также, что переформулировать уравнения (15) в представлениях ге-

оцентрической сферической системы координат можно, формально положив $r_1 = r_2 = r$.

Динамика ТП как твердого тела. Ориентируясь на то, что управление движением ТП выполняется в ее осях, полагаем, что это так называемые строительные оси; причем будем считать, что они ортогональные и являются главными для эллипсоида инерции ТП. отождествим их с осями триэдра ou . Тогда динамика вращения ТП в пространстве Ньютона в осях ou описывается известными уравнениями Эйлера:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{q}_1 - (T_2 - T_3) q_2 q_3 &= M_1; \\ T_2 \dot{q}_2 + (T_1 - T_3) q_1 q_3 &= M_2; \\ T_3 \dot{q}_3 - (T_1 - T_2) q_2 q_1 &= M_3, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mathbf{T} = \text{diag}(T_1, T_2, T_3)$ — тензор инерции ТП в триэдре ou ; $\mathbf{M} = (M_1, M_2, M_3)^T$ — главный вектор моментов, обуславливающих вращение ТП, причем $\mathbf{M} = \mathbf{m}_g + \mathbf{m}_f$, $\mathbf{m}_g$ — гравитационный момент, $\mathbf{m}_f$ — момент сил иной природы; $\mathbf{q} = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{u} + \mathbf{p}$ — вектор абсолютной угловой скорости.

Измерения. Инструментальная база мультисенсорного бортового измерительного комплекса включает $n + 1$ источников данных позиционирования приемников ГЛОНАСС, известным образом размещенных на подвижном объекте (ТП); это означает, что известны (измеряются) как координаты приемников в эллипсоидальной системе $\{\tilde{\varphi}^i, \tilde{\lambda}^i, \tilde{h}^i; i = \overline{0, n}\}$, так и векторы их технологических мест на борту ТП $\{\mathbf{y}^i, i = \overline{0, n}\}$ в приборном трехграннике ou . Кроме того, комплекс включает $n + 1$ векторных измерителей кажущегося ускорения — трехкомпонентных ньютонометров, по месту на борту ТП совмещенных с приемниками ГЛОНАСС. Полагаем, что оси чувствительности всех 3D-ньютонометров коллинеарны соответствующим осям триэдра ou . В качестве не основного возможен также вариант включения в состав комплекса трехкомпонентного датчика абсолютной угловой скорости, т. е. вектора $\mathbf{q}$.

Итог. Ретроспективный обзор изложенного выше безусловно указывает на то, что оно вполне удовлетворяет современной парадигме математической теории систем ("состояние — измерение"). В настоящей статье — это обратная задача движения [16], комплементарная известному теоретико-механическому определению обратной задачи динамики [17, 18], целью решения которой является реконструкция кинематических параметров движения и

обуславливающих его динамических параметров — сил и моментов.

Задачи и решения

Траекторная задача. В нашем случае — это задача о реконструкции кинематических параметров (кинематика — это "геометрия движения" [1]) пространственной кривой (собственно траектории), порождаемой движением геометрической точки, принадлежащей объекту. Такими параметрами являются координаты $(\tilde{\varphi}, \tilde{\lambda}, \tilde{h})$, скорость $(\tilde{\mathbf{v}})$ и ее производные, причем здесь это относится к каждой из точек $o^i (i = \overline{0, n})$.

Траекторная задача и ее решение подробнейшим образом представлены нами в работе [15]. Поэтому здесь это решение рассматривается как свершившаяся данность. Отметим лишь, что концептуальная парадигма, положенная в основу методологии работы [15], заключается в том, что качество оценок кинематических параметров тем выше, чем большим числом производных модель траектории представляется в условиях дискретной темпоральности измерений (позиционирования ТП) и конечной точности как измерений, так и вычислений. Действительно, если первая производная координаты — скорость, а следующая — ускорение, порождаемое соответствующей силой, то далее очередные производные характеризуют уже изменчивость силы и т. п. В проводимых вычислительных экспериментах подтверждена весьма высокая эффективность принятой парадигмы. Таким образом, траекторная задача как задача реконструкции относится к классу математически некорректно поставленных обратных задач (заметим, что понятие обратной задачи в обиход отечественной науки введено известным русским механиком Г. К. Суловым при защите им докторской диссертации в 1880 г. [17]).

Решение траекторной задачи для каждой отдельно взятой точки $o^i (i = \overline{1, n})$ позволяет, что видно из уравнений, оценить (вычислить) равнодействующие удельных сил, обуславливающих каузальность каждой траектории, т. е. векторы (в триэдрах $O^i \tilde{\mathbf{x}}^i$):

$$\tilde{\mathbf{F}}^i = \tilde{\mathbf{F}}^i(\tilde{\varphi}^i, \tilde{\lambda}^i, \tilde{h}^i, \tilde{\mathbf{v}}^i, \dot{\tilde{\mathbf{v}}}^i) = \mathbf{f}^i + \mathbf{g}^i, i = \overline{0, n}.$$

Дальнейшая интерпретация этого факта связана с решением следующей задачи.

Задача ориентации — вторая из задач "геометрии движения". Это задача реконструкции кинематических параметров вращения ТП как твердого тела. Такими параметрами являются углы Эйлера—Крылова $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\theta(t)$, или матрица $\mathbf{A}(\alpha, \beta, \theta)$, и вектор угловой скорости вращения — $\mathbf{p}$. Ниже приводится алгоритм оценивания матрицы $\mathbf{A}(t_k)$ на каждом тактовом интервале времени $\tau = t_{k+1} - t_k$, следующем за временем (t_k) поступления (вовлечения) данных спутникового позиционирования $\{\tilde{\varphi}_k^i, \tilde{\lambda}_k^i, \tilde{h}_k^i; i = \overline{0, n}\}$ в общий технологический процесс их потактовой целевой обработки.

Алгоритм:

Шаг 1. Решаются $n + 1$ траекторных задач и, таким образом: а) вычисляются значения (в триэдрах $o^i \tilde{x}^i$) кинематических параметров траекторий — $\Pi^i = \{\tilde{\varphi}^i, \tilde{\lambda}^i, \tilde{h}^i, \tilde{\mathbf{v}}^i, \dot{\tilde{\mathbf{v}}}^i, \tilde{\mathbf{u}}^i\}, i = \overline{0, n}$; б) с учетом уравнений (15) вычисляются (в триэдрах $o^i \tilde{x}^i$) векторы сил $\mathbf{F}^i, i = \overline{0, n}$; $\mathbf{F}^i = \mathbf{F}^i(\Pi^i)$.

Шаг 2. Вычисляются геоцентрические прямоугольные и сферические координаты точек $o^i, i = \overline{0, n}$:

$$\begin{cases} r_1^i = \rho_1^i + \tilde{h}^i; \\ \begin{cases} \varsigma_1^i = r_1^i \cos \tilde{\varphi}^i \cos \lambda^i, \\ \varsigma_2^i = r_1^i \cos \tilde{\varphi}^i \sin \lambda^i, \\ \varsigma_3^i = (\rho_1^i(1 - e^2) + \tilde{h}^i) \cos \tilde{\varphi}^i; \end{cases} \\ \begin{cases} \lambda^i = \tilde{\lambda}^i, \\ \varphi^i = \arctg \left[\left(1 - \frac{\rho_1^i e^2}{r_1^i} \right) \operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i \right], \\ r^i = |\varsigma|. \end{cases} \end{cases}$$

Шаг 3. Вычисляются образы $\Delta \varsigma^i$ векторов $\mathbf{y}^i$ в триэдре $O\varsigma$:

$$\Delta \varsigma^i = \varsigma^i - \varsigma.$$

Шаг 4. Матрица $\mathbf{A}$ (или углы Эйлера—Крылова) находится в результате решения системы уравнений

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{B}}^T \Delta \varsigma^i, i = \overline{1, n}, \text{ или } \mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{Z}, \quad (17)$$

где $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}^1 : \mathbf{y}^2 : \dots : \mathbf{y}^n)$;

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{z}^1 : \mathbf{z}^2 : \dots : \mathbf{z}^n) = (\tilde{\mathbf{B}}^T \Delta \varsigma^1 : \tilde{\mathbf{B}}^T \Delta \varsigma^2 : \dots : \tilde{\mathbf{B}}^T \Delta \varsigma^n);$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{B}}^0 = \begin{pmatrix} -\sin \lambda & -\sin \tilde{\varphi} \cos \lambda & \cos \tilde{\varphi} \cos \lambda \\ \cos \lambda & -\sin \tilde{\varphi} \sin \lambda & \cos \tilde{\varphi} \sin \lambda \\ 0 & \cos \tilde{\varphi} & \sin \tilde{\varphi} \end{pmatrix}.$$

Примеры вариантов решений:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{Y} \mathbf{Y}^T)(\mathbf{Z} \mathbf{Y}^T)^{-1}, \mathbf{A} = (\mathbf{Y} \mathbf{Z}^T)(\mathbf{Z} \mathbf{Z}^T)^{-1}.$$

В частом случае, когда $n = 1$, пространственная ориентация объекта может быть определена только с точностью до его вращения вокруг вектора $\mathbf{y}^1$. Однако и в этом случае возможны приемлемые оценки матрицы $\mathbf{A}$ (или углов α, β, θ), если, например, значение угла α отождествить со значением путевого угла ψ , оцениваемым при решении траекторной задачи при условии учета движения объекта в реальной среде. Соответствующая система уравнений принимает вид

$$\{\mathbf{y}^1 = \mathbf{A}(\alpha, \beta, \theta) \mathbf{z}^1, \alpha = -\psi\}.$$

К модели (17) может быть сведен и случай движения в известном гравитационном поле. Действительно, если $\tilde{\mathbf{f}}^i = \tilde{\mathbf{F}}^i - \tilde{\mathbf{g}}^i$ (в осях $o^i \tilde{x}^i$), то $\tilde{\mathbf{f}}^i = \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{B}}^i \tilde{\mathbf{f}}^i, i = \overline{1, n}$, (в осях $O\tilde{x}$), и если $\mathbf{Z} = (\tilde{\mathbf{f}}_y^1 : \tilde{\mathbf{f}}_y^2 : \dots : \tilde{\mathbf{f}}_y^n)$, а $\mathbf{Y} = (\mathbf{f}_y^1 : \mathbf{f}_y^2 : \dots : \mathbf{f}_y^n)$, где $\mathbf{f}_y^i$ — векторы кажущихся ускорений, измеряемые ньютонометрами в триэдре Oy , то $\mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{Z}$. Здесь необходимо обратить внимание на парциальные связи $\mathbf{A}^i(\alpha^i, \beta^i, \theta^i) = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{B}}^i, i = \overline{0, n}$.

Необходимо отметить, что в ряде случаев может быть достаточным обращение к таким моделям при $n = 1$:

$$\{\mathbf{f}_y = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{f}}, \mathbf{y}^1 = \mathbf{A} \mathbf{z}^1\},$$

где $\mathbf{z}^1 = \tilde{\mathbf{B}}^T \Delta \varsigma^1$.

Перейдем к оценке вектора угловой скорости $\mathbf{p}$ ТП относительно триэдра $O\tilde{x}$ в проекциях на оси oy . Это можно сделать двумя способами. Первый из них предполагает численное дифференцирование найденных углов Эйлера—Крылова с использованием технологии, упоминавшейся выше и подробно изложенной в работе [15], а затем, с учетом уравнений Пуассона ($\mathbf{P} = -\dot{\mathbf{A}} \mathbf{A}^T$), непосредственное вычисление вектора $\mathbf{p}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)_y^T = & (\dot{\theta} + \dot{\alpha} \sin \beta, \dot{\beta} \cos \theta + \\ & + \dot{\alpha} \sin \theta \cos \beta, \dot{\alpha} \cos \theta \sin \beta - \dot{\beta} \sin \theta)^T. \end{aligned}$$

Второй способ апеллирует к непосредственным результатам решения траекторных задач, а именно, к вычисленным значениям векторов скоростей — $\{\tilde{\mathbf{v}}, \tilde{\mathbf{v}}^1, \tilde{\mathbf{v}}^2, \dots, \tilde{\mathbf{v}}^n\}$. В проекциях на оси триэдра oy имеем

$$\mathbf{v}_y^i = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{B}}^i \tilde{\mathbf{v}}^i, i = \overline{0, n}.$$

Тогда, учитывая, что $\mathbf{v}_y^i = \mathbf{v} + \mathbf{P}\mathbf{y}^i$ и, таким образом, $\Delta\mathbf{v}^i = \mathbf{v}_y^i - \mathbf{v} = \mathbf{P}\mathbf{y}^i$, приходим к матричному уравнению $(\Delta\mathbf{v}^1 : \Delta\mathbf{v}^2 : \dots : \Delta\mathbf{v}^n) = \mathbf{P}(\mathbf{y}^1 : \mathbf{y}^2 : \dots : \mathbf{y}^n)$, или $\mathbf{W} = \mathbf{P}\mathbf{Y}$, где $\mathbf{W} = (\Delta\mathbf{v}^1 : \Delta\mathbf{v}^2 : \dots : \Delta\mathbf{v}^n)$. При $n \geq 2$ полученное уравнение может быть решено относительно тензора $\mathbf{P}$ двумя способами: $\mathbf{P} = (\mathbf{W}\mathbf{Y}^T)(\mathbf{Y}\mathbf{Y}^T)^{-1}$ и $\mathbf{P} = (\mathbf{W}\mathbf{W}^T)(\mathbf{Y}\mathbf{W}^T)^{-1}$. Вектор $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)^T$ является сопутствующим для тензора $\mathbf{P}$ и как таковой легко определяется, учитывая, что

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & -p_3 & p_2 \\ p_3 & 0 & -p_1 \\ -p_2 & p_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Зная теперь оценки угловых скоростей $\boldsymbol{\omega}$, $\mathbf{u}$ и $\mathbf{p}$, можем вычислить вектор абсолютной угловой скорости ТП в проекциях на оси триэдра ou . Принимая во внимание, что ранее вектор $\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{u}$ рассматривался нами в проекциях на оси $o\tilde{x}$, имеем:

$$\mathbf{q}_y = \mathbf{A}(\boldsymbol{\omega} + \mathbf{u}) + \mathbf{p}.$$

Обращаясь к уравнениям Эйлера и зная тензор инерции ТП, можно вычислить главный момент $\mathbf{M} = (M_1, M_2, M_3)$, обуславливающий ее вращение с угловой скоростью $\mathbf{q}_y$. Также возможна постановка обратной задачи определения тензора $\mathbf{T}$ при известном $\mathbf{M}$.

Задача мобильной вычислительной векторной гравиметрии. В отличие от преобладающей в настоящее время интерпретации практической гравиметрии как скалярной [19, 20], в контексте изложенного выше, по сути, имеется возможность достаточно прозрачной актуализации идеи векторной гравиметрии как исключительно вычислительного процесса, не включающего необходимость непосредственного обращения к исторически характерной для скалярной гравиметрии методологии так называемых поправок Этвеша. Концептуальная парадигма вычислительной гравиметрии, рассматриваемая здесь, представляется наиболее перспективной для ее реализации на подвижных объектах. Последнее с очевидностью следует из уравнений (15). Действительно, если матрицы $\mathbf{A}^i, i = \overline{0, n}$, определены, то

$$\mathbf{g}^j = \mathbf{F}^j - (\mathbf{A}^i)^T \mathbf{f}_y^j, \quad (18)$$

где, напомним, $\mathbf{A}^j = \mathbf{A}\mathbf{B}^T\tilde{\mathbf{B}}^j, j = \overline{0, n}$.

Пространственная множественность измерений напряженности гравитационного поля, заметно усиливаемая движением ТП, позволяет их интерпретацию в этом случае рассматривать как возможный способ численного решения проблемы подвижной гравитационной градиентометрии, в технологическом аспекте дополняющий уже известные [19].

Вычислительный эксперимент

В процессе выполнения настоящего исследования разработан комплекс программ, функционально ориентированный на численную верификацию изложенных выше модельных представлений, а также на работу с реальными данными в режимах текущего времени (online) или/и апостериорном; при этом использована платформа разработки Julia.

Построение имитатора траекторных измерений.

Алгоритм:

Шаг 1. Задаются исходные данные:

$[t_0, t_f]$ — интервал времени движения ТП,

$\psi(t)$ — путевой угол движения ТП,

$\tilde{v} = \sqrt{\tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_2^2}$ — модуль горизонтальной скорости ТП в плоскости $o\tilde{x}_1\tilde{x}_2$,

a, e^2 — параметры Земного эллипсоида,

$\{\tilde{\varphi}(t_0), \lambda(t_0), \tilde{h}(t_0)\}$ — начальные координаты места ТП,

$\{\alpha(t), \beta(t), \theta(t)\}$ — углы Эйлера—Крылова и соответствующая матрица $\mathbf{A}$,

$\tilde{h}(t)$ — высота траектории,

$\mathbf{y}^i, i = \overline{1, N}$, — векторы места точек o^i в триэдре ou .

Шаг 2. Генерируются текущие эллипсоидальные координаты траектории ТП (точки o), для чего решаются уравнения:

$$\dot{\tilde{\varphi}} = \tilde{v}_2/[a(1 - e^2)/(1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi})^{3/2} + \tilde{h}], \quad \tilde{\varphi}(0),$$

$$\dot{\tilde{\lambda}} = \tilde{v}_1/[a/(1 - e^2 \sin^2 \tilde{\varphi})^{1/2} + \tilde{h}] \cos \tilde{\varphi}, \quad \tilde{\lambda}(0),$$

$$\dot{\tilde{h}} = \tilde{h}(t),$$

$$v_1 = \tilde{v} \sin \psi,$$

$$v_2 = \tilde{v} \cos \psi,$$

$$r_1 = \rho_1 + \tilde{h},$$

$$r_2 = \rho_2 + \tilde{h},$$

$$r_3 = \rho_3 + \tilde{h}.$$

Шаг 3. Вычисляются геоцентрические координаты ТП:

$$\begin{aligned}\lambda &= \tilde{\lambda}, \\ \varphi &= \arctg \left[\left(1 - \frac{\rho_1 e^2}{r_1} \right) \operatorname{tg} \tilde{\varphi} \right], \\ \varsigma_1 &= (\rho_1 + \tilde{h}) \cos \tilde{\varphi} \cos \lambda, \\ \varsigma_2 &= (\rho_1 + \tilde{h}) \cos \tilde{\varphi} \sin \lambda, \\ \varsigma_3 &= [\rho_1 (1 - e^2) + \tilde{h}] \sin \tilde{\varphi}.\end{aligned}$$

Шаг 4. Вычисляются матрицы $\mathbf{A}(\alpha, \beta, \theta)$ и $\mathbf{B}(\tilde{\varphi}, \lambda)$.

Шаг 5. Вычисляются образы $(\mathbf{y}_{\varsigma}^i, i = \overline{1, n})$ векторов $\mathbf{y}^i$ в O_{ς} :

$$\mathbf{y}_{\varsigma}^i = \mathbf{B}(\tilde{\varphi}, \lambda) \mathbf{A}^T \mathbf{y}^i.$$

Шаг 6. Вычисляются векторы ς^i мест точек $o^i, i = \overline{1, n}$ в O_{ς} :

$$\varsigma^i = \varsigma + \mathbf{y}_{\varsigma}^i.$$

Шаг 7. Вычисляются сферические координаты точек $o^i, i = \overline{1, n}$:

$$\begin{aligned}r^i &= |\varsigma^i|, \\ \varphi^i &= \arcsin \left(\frac{\varsigma_3^i}{r^i} \right), \\ \cos \lambda^i &= \frac{\varsigma_1^i}{r^i \cos \varphi^i} \\ \sin \lambda^i &= \frac{\varsigma_2^i}{r^i \sin \varphi^i} \end{aligned} \Rightarrow \lambda^i.$$

Шаг 8. Вычисляются эллипсоидальные координаты точек $o^i, i = \overline{1, n}$.

$$\tilde{\lambda}^i = \lambda^i;$$

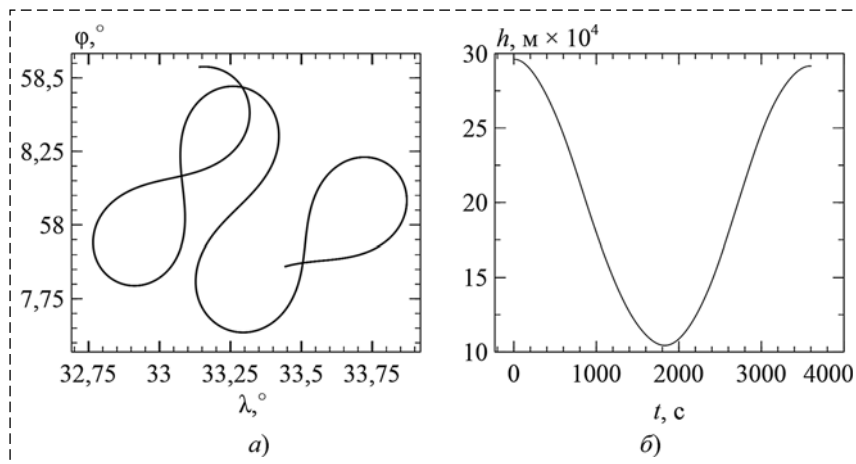


Рис. 1. Элементы траектории движения: широта и долгота (а), высота (б)
Fig. 1. Trajectory elements: latitude and longitude (a), altitude (b)

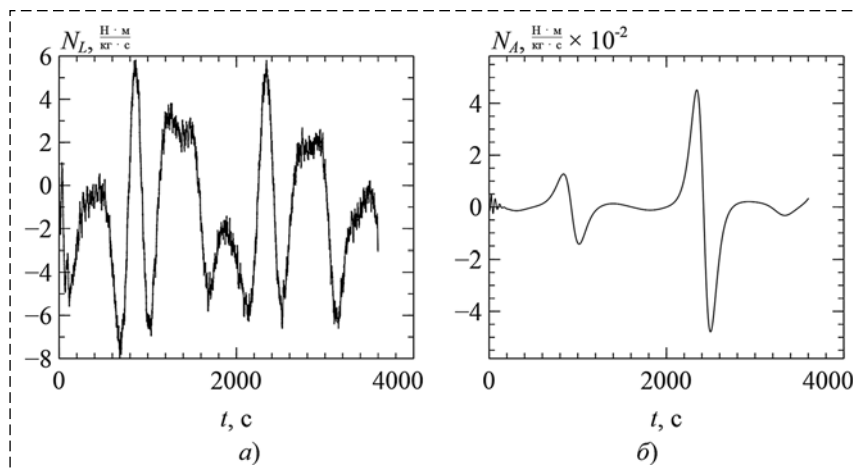


Рис. 2. Эволюции оценок значений удельных мощностей: линейной (а), угловой (б)
Fig. 2. Evolution of specific power estimation values: linear (a), angular (b)

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \tilde{\varphi}^i &= \operatorname{tg} \varphi^i / (1 - \rho_1^i e^2 / r_1^i); \quad r_1^i = \rho_1^i + \tilde{h}^i; \\ \tilde{h}^i &= r^i \frac{\sin \varphi^i}{\sin \tilde{\varphi}^i} - \rho_1^i (1 - e^2); \\ \tilde{\varphi}^i &= \arctg \tilde{\varphi}.\end{aligned}$$

Шаг 9. Заключительный. Формируются траекторные измерения

$$\begin{aligned}J^i &= (J_1^i = \lambda^i + \varepsilon_{\lambda}, \\ J_2^i &= \tilde{\varphi} + \varepsilon_{\varphi}, J_3^i = h + \varepsilon_h),\end{aligned}$$

где $\varepsilon_{\lambda}, \varepsilon_{\varphi}, \varepsilon_h$ — погрешности спутникового позиционирования.

Далее приводятся некоторые результаты вычислительного эксперимента, выполненного для дрона, движущегося со скоростью 150 м/с по траектории, представленной на рис. 1.

Масс-геометрические характеристики дрона представлены удельными значениями моментов инерции $T_1 = 2,04 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, $T_2 = 3,76 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, $T_3 = 2,02 \cdot 10^6 \text{ м}^2$. Координаты места элементов мультиагентной системы $\mathbf{y}^i, i = \overline{0, 4}$, представлены значениями $\mathbf{y} = \mathbf{y}_0 = (0, 0, 0)^T$, $\mathbf{y}_1 = (10 \text{ м}, 0, 0)^T$, $\mathbf{y}_2 = (0, 10 \text{ м}, 0)^T$, $\mathbf{y}_3 = (0, -10 \text{ м}, 0)^T$,

$y_4 = (0, 0, 5 \text{ м})^T$. Тактовый период позиционирования $\tau = 0,2 \text{ с}$; шумы измерений (позиционирования) по координатам характеризуются среднеквадратическими значениями (СКЗ) $\sigma = 17 \text{ м}$, времена корреляций $\tau_c = 4 \text{ с}$.

На рис. 2, а, б представлены графики эволюции удельных (на 1 кг массы) мощностей линейного ($N_L(t) = \mathbf{F}^T \mathbf{v}$) и угловых ($N_A(t) = \mathbf{M}^T \mathbf{q}$) движений дрона; при этом оценочные СКЗ погрешностей $\sigma(N_L) = 1,94 \cdot 10^{-1}$, $\sigma(N_A) = 9,88 \cdot 10^{-4}$.

Полный набор данных выполненного эксперимента доступен через интернет-ресурс в формате HDF5 [21].

Заключение

Представленные в статье аналитические конструкции, их численные аналоги и комплекс программ позволяют достичь достаточно широких возможностей для проведения всего круга исследований, связанных с планированием движений объектов различного целевого назначения, их модельных и натурных испытаний, а также соответствующих систем высокоточного управления движением.

Список литературы

1. Ишлинский А. Ю. Классическая механика и силы инерции. М.: Едиториал УРСС, 2018. 320 с.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.
3. Kelly R. J., Davis J. Required Navigation Performance (RNP) for Precision Approach and Landing with GNSS Application // Navigation (USA). 1994. N. 1. P. 1–30
4. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

5. Global Positioning System: Theory and Applications. Vol. 1. Edited by W. Parkinson, J. J. Spiker. Washington: AIAA, 1996.
6. Farrell J. A. Aided Navigation Systems: GPS and High Rate Sensor. New York: McGraw-Hill, 2008. 552 p.
7. Бабич О. А. Вычисление углового положения самолета по сигналам со спутниковой радионавигационной системы // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 4. С. 152–162.
8. Девятисильный А. С., Крыжко И. Б. Модели навигационных определений с помощью спутниковой системы NAVSTAR // Математический сборник. 1998. № 6. С. 108–117.
9. Девятисильный А. С., Крыжко И. Б. Исследование модели навигационных определений с помощью спутниковой системы типа ГЛОНАСС // Космические исследования. 1999. Т. 37. № 3. С. 261–266.
10. Калман Р., Фалб Л., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.
11. Robert G. B., Patrick Y. C. H. Introduction to random signals and applied Kalman filtering. USA, 2012. 383 p.
12. Бюшгенс С. С. Дифференциальная геометрия: учебник для государственных университетов. М.: URSS; Ком-Книга, 2006. 302 с.
13. Robbin J. W., Salamon D. A. Introduction to Differential Geometry. Berlin: Springer Spektrum, 2021. 418 p.
14. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 823 с.
15. Девятисильный А. С., Шурыгин А. В., Стоценко А. К. Аналитическое конструирование и численное исследование моделей определения движения на данных ГЛОНАСС // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 11. С. 782–787.
16. Peng Y. G., Xu C. D., Li Z. Application of MIEKF optimization algorithm in GPS positioning and velocity measurement // Computer Simulation. 2018. Vol. 35, N. 7. P. 65–69.
17. Галиуллин А. С. Обратные задачи динамики. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 144 с.
18. Alexander G. R. Inverse Problems. Boston: Springer, 2005. 443 p.
19. Вольфсон Г. В. Применение гравиметрических технологий в геофизике. СПб.: ГНЦРФ. ЦНИИ "Электроприбор", 2002. 199 с.
20. Li Q., Verdun J., Cali J., Diamant M., Maia M. A., Panet I. Estimation of gravity field by mobile gravimetry // American Geophysical Union. Fall Meeting. 2011.
21. Набор данных работы программы. Систем. требования: HDF5, URL: <https://owncloud.dvo.ru/s/WFCpara7k-TY5b3H> (дата обращения: 25.11.2021).

Mathematical Models And Algorithms of the Onboard Multi-Agent Integrated Motion Determination System

A. S. Devyatisilny, devyatis@dvo.ru, A. V. Shurygin, ashurygin@dvo.ru,
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: Devyatisilny Aleksandr S., Dr. of Sci., Professor, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@dvo.ru

Accepted on February 24, 2022

Abstract

The article describes the methodological and technological aspects of the numerical synthesis of an integrated multifunctional system for assimilation of navigation information delivered by spatially spaced on-board sensors for satellite positioning of a moving object (technological platform — TP) and three-component apparent acceleration vector meters combined with them — 3D-newtonometers. This is main formed image of the considered real physical system. Modern

methods and practices of systems for monitoring and controlling moving objects are essentially focused on deep mathematically formalized representations of this subject area. In the light of such ideas, one should consider the content of the article on the problem of complementarity of two types of information that are different in physical nature and on the prospects for such a study. The main model mathematically formalized constructions follow the fundamental Kalman paradigm "state — measurement" and focused on the numerical solution of ill-posed inverse problems of determining the motion of a TP as a rigid body with the ability to work in real time. An ellipsoidal system was chosen as the base coordinate system, in addition other coordinate systems were introduced as well, which inevitably determine the solution of problems due to the formed set of corresponding transformations. Algorithms are presented for calculating the kinematic parameters of the trajectory and spatial orientation of the TP, the characteristics of the causality of motion — forces and moments, and also numerical solutions for problems of mobile vector gravimetry and gravitational gradiometry are proposed. An algorithm for simulating onboard multipositioning has been developed, which determines the conduct of verifying computational experiments. Some of their results are given in the article. The software package that implements the simulation algorithms and solutions is developed using Julia language and allows to obtain a complete set of data on the state of all systems at any discrete time point of the simulator.

Keywords: mathematical model, algorithm, ill-posed problem, inverse problem, inertial information, satellite positioning, integrated system, motion parameters, ellipsoidal coordinate system, Julia

For citation:

Devyatisilny A. S., Shurygin A. V. Mathematical Models And Algorithms of the Onboard Multi-Agent Integrated Motion Determination System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 317—326.

DOI: 10.17587/mau.23.317-326

References

1. **Ishlinskij A. J.** Classical mechanics and inertial forces, Moscow, Editorial, URSS, 2018, 320 p. (in Russian).
2. **Andreev V. D.** The theory of inertial navigation. Correctable systems. Moscow, Nauka, 1967, 648 p. (in Russian).
3. **Kelly R. J., Davis J.** Required Navigation Performance (RNP) for Precision Approach and Landing with GNSS Application, *Navigation (USA)*, 1994, no. 1, pp. 1—30.
4. **Perov A. I., Harisov V. N.** GLONASS. Principles of construction and operation. Moscow, Radiotekhnika, 2005, p. 688 (in Russian).
5. **Parkinson W., Spiker J. J.** Global Positioning System: Theory and Applications, vol. 1, Washington, AIAA, 1996.
6. **Farrell J. A.** Aided Navigation Systems: GPS and High Rate Sensor, New York, McGraw-Hill, 2008, 552 p.
7. **Babich O. A.** Calculation of the angular position of the aircraft using signals from the satellite radio navigation system, *Izvestija. RAN. Teorija i sistemy upravlenija*, 1996, no. 4, pp. 152—162 (in Russian).
8. **Devyatisilny A. S., Kryzhko I. B.** Models of navigation definitions using the NAVSTAR satellite system, *Matematicheskij sbornik*, 1998, no. 6, pp. 108—117 (in Russian).
9. **Devyatisilny A. S., Kryzhko I. B.** Study of a model of navigation definitions using a satellite system such as GLONASS, *Kosmicheskie issledovaniya*, 1999, vol. 37, no. 3, pp. 261—266 (in Russian).
10. **Kalman R., Falb L., Arbib M.** Essays on the mathematical theory of systems, Moscow, Mir, 1971, 400 p. (in Russian).
11. **Robert G. B., Patrick Y. C. H.** Introduction to random signals and applied Kalman filtering, USA, 2012, 383 p.
12. **Bjushgens S. S.** Differential geometry: a textbook for public universities, Moscow, URSS; KomKniga, 2006, 302 p. (in Russian)
13. **Joel W. Robbin, Dietmar A. Salamon.** Introduction to Differential Geometry, Springer Spektrum, Berlin, 2021, 418 p.
14. **Lojczanskij L. G.** Fluid and gas mechanics, Moscow, Nauka, 1987, 823 p. (in Russian).
15. **Devyatisilny A. S., Shurygin A. V., Stotsenko A. K.** Analytical Design and Numerical Research of Motion Detection Models Based on GLONASS Data, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2017, vol. 18, no. 11, pp. 782—787 (in Russian), doi: 10.17587/mau.18.782-787
16. **Peng Y. G., Xu C. D., Li Z.** Application of MIEKF optimization algorithm in GPS positioning and velocity measurement, *Computer Simulation*, 2018, vol. 35, no. 7, pp. 65—69.
17. **Galiullin A. S.** Inverse problems of dynamics, Moscow, Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1981, 144 p. (in Russian).
18. **Alexander G. R.** Inverse Problems, Boston, Springer, 2005, 443 p.
19. **Vol'fson G. V.** Application of gravity-inertial technologies in geophysics, SPb, GNCRF, CNII "Jelektropribor", 2002, 199 p. (in Russian).
20. **Li Q., Verdun J., Cali J., Diamant M., Maia M. A., Pannet I.** Estimation of gravity field by mobile gravimetry, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2011.
21. **Working** result datasets in HDF5 format, available at: <https://owncloud.dvo.ru/s/WFCpara7kTY5b3H>

А. М. Агеев, канд. тех. наук, докторант, ageev_bbc@mail.ru,
ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия", г. Воронеж,
В. Н. Буков, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., v_bukov@mail.ru,
АО "НИИАО", г. Жуковский,
В. А. Шурман, главный специалист, vshurman@rpkb.ru,
АО "РПКБ", филиал в г. Жуковский

Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Часть 2. Парный арбитраж вычислителей*

Решается задача оперативного выбора подходящей в сложившихся условиях функционирования конфигурации компонентов избыточного комплекса бортового оборудования в интересах обеспечения высокой отказоустойчивости комплекса, а также достижения других эксплуатационно-технических характеристик. Основу системы управления избыточностью комплекса составляют супервизоры конфигураций — программные объекты по числу заблаговременно отработанных конкурентоспособных конфигураций разнородного и неуниверсального оборудования комплекса. Выбор предпочтительной конфигурации предлагается осуществлять путем выполнения многоуровневого арбитража, включающего две фазы парного арбитража вычислителей комплекса и парный арбитраж супервизоров конфигураций. Средства обоих видов арбитража предлагается включать в каждый супервизор конфигурации, что обеспечивает его самодостаточность при участии в конкурсном отборе. Вторая часть статьи посвящена арбитражу вычислителей для реализации функций управления избыточностью. Подход применим к вычислительной среде с множеством сопоставимых по возможностям вычислительных устройств и содержит две фазы. В первой фазе осуществляется предварительный выбор конкурирующей пары вычислителей — претендентов на реализацию в них функций управления избыточностью. В перерыве между фазами в вычислителях пары реализуются процедуры парного арбитража конфигураций, приведенные в первой части статьи. Во второй фазе осуществляется окончательный выбор α -вычислителя, в котором будет реализован победивший в арбитраже супервизор. Для достижения предельно возможной децентрализации процедур выбора и, как следствие, исключения "узких" в смысле надежности мест предложены дополнительно: организация защищенного обмена данными между вычислителями на основе технологии распределенного реестра; процедура парного арбитража вычислителей, заключающаяся во взаимной перекрестной валидации доминирующих супервизоров предварительно выделенной пары за счет сравнения матриц предпочтений, включающей информационные послышки субъектов арбитража. Приводится методический пример, демонстрирующий особенности функционирования системы в условиях деградации вычислителей. Предложенный подход может применяться для решения задач управления реконфигурированием разнородных вычислительных средств комплексов оборудования технических объектов.

Ключевые слова: отказоустойчивая система, управление избыточностью, парный арбитраж вычислителей, распределенный реестр, правило предпочтения, матрица предпочтений

Введение

Создание перспективных технических систем, обладающих высоким уровнем отказоустойчивости и другими значимыми преимуществами [1–3], требует решения ряда научно-практических и технических проблем. Среди них одно из центральных мест занимают вопросы построения архитектуры бортовой интегрированной вычислительной среды (БИВС) в составе комплексов бортового оборудования (КБО) подвижных объектов, таких как робототехнические комплексы, морские суда, летательные (воздушные, космические) аппараты, обеспечивающей эффективное использование избыточных ресурсов в интересах достижения

высокой отказоустойчивости и живучести последних.

В технических, информационных и энергетических распределенных вычислительных системах для оперативной обработки данных с успехом применяются технологии распределенного реестра блокчейн [4–6]. К особенностям такого подхода следует отнести распределенные вычисления, безопасную среду взаимодействия участников сети, надежное хранение информации [5]. Известны работы различных авторов [7–12] в области управления многомашинной вычислительной сетью. Например, предлагаемый в работах [11, 12] подход исключает жесткое закрепление подзадач общей задачи управления за отдельными процессорными узлами (ПУ) из состава сетевой информационно-управляющей системы (СИУС). Вместо этого предусмотрено перераспределение задач между

*Часть 1 опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2022, Т. 23, № 5.

ПУ в случае выхода из строя некоторых из них. Программное реконфигурирование СИУС позволяет существенно повысить вероятность ее безотказной работы при малых дополнительных аппаратных затратах, в том числе за счет равномерного распределения вычислительной нагрузки между ПУ. Там же предложен принцип мультиагентного взаимодействия ПУ, когда в каждом из них располагается программный агент (локальный диспетчер), осуществляющий процедуру периодического диагностирования и подтверждения его работоспособности, предоставляемого другим агентам. Если в заданный период времени какой-либо из агентов не подтвердил работоспособность своего ПУ, то остальные агенты инициируют процедуру реконфигурирования системы.

Анализ опубликованных работ по СИУС позволяет сделать вывод, что изложенный в них подход позволяет реализовать распределенное управление технической системой с избыточными компонентами. Однако при системном и более тщательном рассмотрении обнаруживается ряд ограничений, среди которых существенны следующие: а) подтверждение работоспособности каждого ПУ доверяется исключительно этому же ПУ, достоверность такого подтверждения никак не контролируется; б) процедура

размещения операционных вершин графа решаемой задачи не защищена от аппаратных или программных ошибок технических средств ПУ; в) не предусмотрен механизм валидации (подтверждения безошибочности) сформированной конфигурации; г) коммутационная сеть предполагается функционирующей безошибочно.

Настоящая работа нацелена на решение или, по крайней мере, смягчение этих и других проблемных вопросов согласования работы нескольких вычислителей в составе интегрированного КБО.

Особенности многомашинных вычислительных систем

При известных достоинствах многомашинная архитектура БИВС привносит ряд специфических особенностей в контексте обеспечения высокой отказоустойчивости бортового оборудования. Прежде всего это связано с распределением ресурсов и организацией бесперебойной работы при ошибках отдельных вычислительных устройств. Табл. 1 иллюстрирует характерные ситуации, возникающие в БИВС с избыточным числом вычислителей, реализующих набор приложений программного обеспечения (ПО) и имеющих встроенные

Таблица 1
Table 1

Характерные ситуации с избыточным числом вычислителей БИВС
Typical situations with an excessive number of OICE computers

№	Ситуация	Основные причины	Особенности функционирования	Способы преодоления
1	Правильная работа	—	Все задачи решаются правильно и в срок	Ничего не требуется
2	Отказ вычислителя	Повреждения аппаратуры и/или ПО, отсутствие питания	Вычисления прекращаются, вычислитель не реагирует на входные данные, ВСК работоспособны	Замена вычислителя, восстановление питания, переустановка ПО
3	Зависание вычислений	Повреждения аппаратуры, кратковременное прекращение питания, перегрузка вычислителя, ошибки ПО, заикливание программы, затянувшееся ожидание	Вычисления останавливаются, вычислитель не реагирует на входные данные, ВСК работоспособны	Замена отказавшего вычислителя, возможна его перезагрузка
4	Наблюдаемые ошибки	Повреждения аппаратуры, сбой в процедурах программы	ВСК работоспособны, ошибки определяются с различной детализацией, вычислитель не может участвовать в их исправлении	Исправление по данным ВСК, повторное выполнение вычислений, возможна замена отказавшего вычислителя
5	Ненаблюдаемые ошибки без агрессии	Повреждения аппаратуры, искаженные команды программы, искаженные данные	ВСК неработоспособны, вычислитель может участвовать в исправлении ошибок	Проведение парной валидации вычислителей, замена отказавшего вычислителя
6	Ненаблюдаемые ошибки с агрессией		ВСК неработоспособны, вычислитель навязывает результат, не согласованный с данными	Вычислитель блокируется и заменяется

средства контроля (ВСК), а также основные способы выхода из таких ситуаций¹.

В табл. 1 наблюдаемыми названы ошибки, обнаруживаемые ВСК. Ситуация 1 характеризует штатную работу БИВС и не требует никаких мер, в то время как ситуация 6 соответствует полной потере работоспособности вычислительной системы. Ситуации 2–5 отражают деградацию вычислительной системы, но содержат потенциальную возможность продолжения функционирования, и именно они являются предметом дальнейшего рассмотрения.

Постановка задачи

В работах [13, 14] изложена общая концепция построения КБО с управляемой избыточностью, предполагающая проведение процедур согласованных арбитражей, во-первых, вычислителей и, во-вторых, конфигураций избыточного КБО. При этом каждая заранее просчитанная конфигурация соотносится со специальным программным объектом, названным *супервизором конфигурации* (СК). На СК возложены все функции по подготовке, поддержанию и реализации (за счет коммутации компонентов оборудования и запуска ПО в вычислителях) соответствующей конфигурации КБО.

В первой части статьи [15] были представлены общие положения многоуровневого арбитража конфигураций, предложены варианты алгоритма парного арбитража, предназначенные для сравнения супервизоров в целях выбора конфигурации, предпочтительной в сложившихся условиях.

В обеспечение реализации подхода предложено периодически или при обнаружении неправильного функционирования осуществлять выбор наиболее подходящего вычислителя для текущих условий функционирования комплекса (режима и этапа полета, технического состояния, завершенности подготовительных процедур, наличия внешних команд и воздействий).

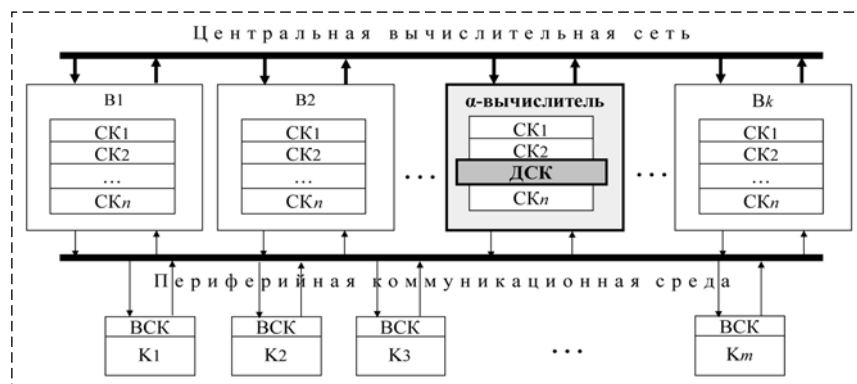


Рис. 1. Структура связей избыточного КБО:

$B1, \dots, Bk$ — вычислители, $K1, \dots, Km$ — компоненты

Fig. 1. The redundant OEC connection structure:

$B1, \dots, Bk$ — computers, $K1, \dots, Km$ — components

Этот вычислитель, называемый α -вычислителем, должен периодически (до истечения своих полномочий) проводить арбитраж всех СК (другими словами, арбитраж соотношенных с ними конфигураций), результатом которого является выбор доминирующего СК (ДСК) и последующая реализация соответствующей ему конфигурации. Пространственное размещение² и структуру связей компонентов при указанном подходе поясняет рис. 1.

Целью настоящей статьи является изложение порядка и правил арбитража вычислителей в рамках супервизорного подхода управления избыточностью, объяснение способов преодоления нештатных ситуаций, перечисленных в табл. 1, и демонстрация возможности реализации арбитража.

Исходные положения арбитража

К исходным посылкам процедуры децентрализованного арбитража вычислителей избыточного КБО относятся следующие положения:

А. Для осуществления управления избыточностью КБО в нем предусмотрено определенное множество из k сопоставимых по возможностям и располагаемым связям вычислителей, в каждый из которых загружена копия специального программного обеспечения управления избыточностью (СПО УИ), включая набор из n СК со всеми данными, необходимыми для реализации соотношенных с ними (выбранных заблаговременно) допустимых конфигураций КБО.

¹ В анализе ситуаций и подготовке таблицы принял участие А. М. Бронников.

² На рис. 1 термин "центральная вычислительная сеть" допускает территориально разнесенное размещение вычислителей в комплексе оборудования.

Б. Процедура арбитража выполняется за счет собственных возможностей вычислителей без использования дополнительных (внешних) аппаратных и программных ресурсов.

В. Каждый вычислитель имеет доступ к данным других вычислителей.

Г. Арбитраж вычислителей выполняется либо периодически по истечении цикла назначенной длительности, либо при возникновении ошибки α -вычислителя.

Д. В каждом цикле управления избыточностью при подготовке арбитража вычислителей путем выполнения соответствующих процедур мониторинга в каждом вычислителе определяется его индекс готовности (ИГ), при этом бинарное значение ИГ (1 — готов, 0 — не готов) отражает исправность аппаратной части, полноту энергетической, информационной и других видов поддержки, состояние ПО и завершение загрузок необходимых данных.

Е. Победивший в арбитраже вычислитель (α -вычислитель) средствами ДСК управляет реализацией предпочтительной конфигурации КБО, а также организует взаимодействие всех привлеченных вычислителей.

Алгоритм межвычислительного арбитража

Арбитраж вычислителей содержит две фазы и выполняется по следующим правилам.

Фаза 1 — предварительный отбор:

- формирование группы готовых к работе вычислителей с ИГ = 1;
- выделение пары вычислителей¹ в группе готовых вычислителей по принятому дискриминационному правилу (например, по порядковым номерам);

¹ Например, в первом цикле это могут быть вычислители с порядковыми номерами 1 и 2. Соответственно, вычислители номерами от 3 до k состоят в горячем резерве или могут, по усмотрению разработчика, использоваться временно по другому назначению.

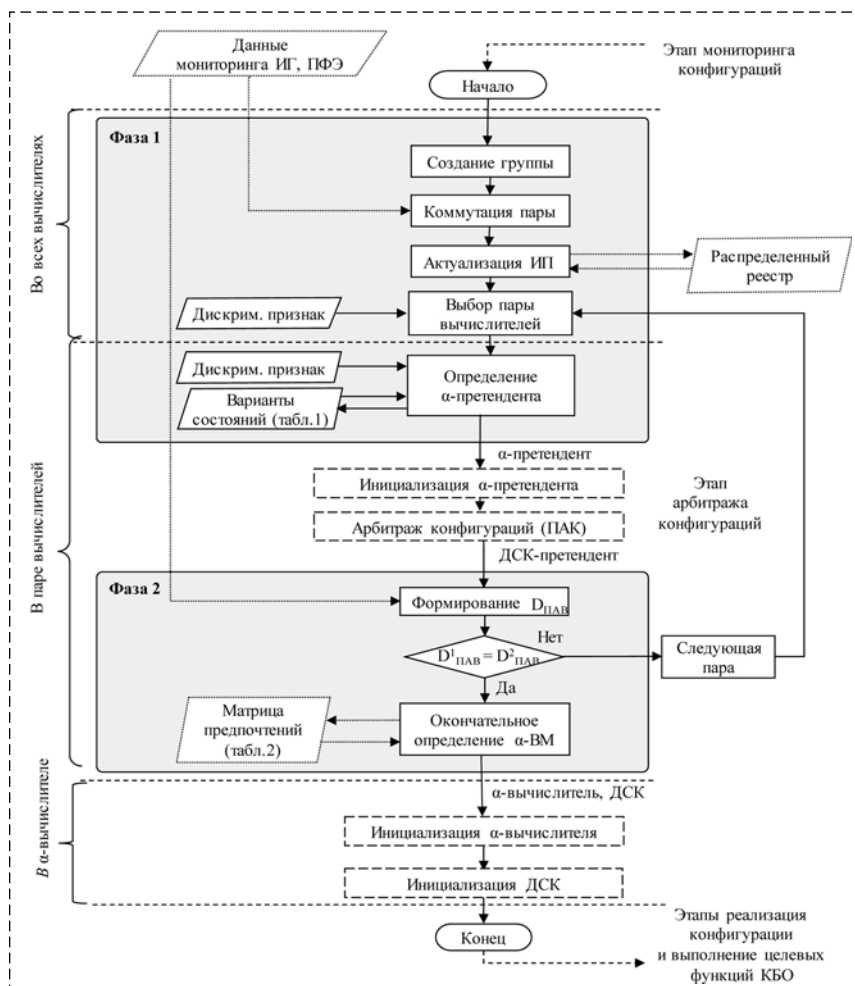


Рис. 2. Алгоритм арбитража вычислителей в структуре СУИ

Fig. 2. Algorithm of computers arbitration in the structure of the RCS

— выбор претендента на статус α -вычислителя (α -претендента) в выделенной паре вычислителей по дискриминационному правилу (второй вычислитель пары при этом объявляется резервным (α -резерв)).

В перерыве между фазами арбитража:

- α -претендент осуществляет управление работой вычислителей в части функций управления избыточностью (УИ);
- вычислители выделенной пары проводят независимый парный арбитраж конфигураций (ПАК) с выбором ДСК-претендента (возможен вариант: ДСК выбирается только α -претендентом, соответствующий идентификатор передается α -резерву, где соответствующий СК сохраняется как ДСК-резерв).

Фаза 2 — итоговый конкурс:

- вычислители выделенной пары (один из них α -претендент, второй — α -резерв) вступают в парный арбитраж вычислителей (ПВВ) в целях выявления в паре такого вычислите-

ля, который безошибочно воспроизводит все характеристики конфигурации, соотнесенной с ДСК, это действие, по сути, содержит валидацию предпочтительной конфигурации;

— вычислитель, выигравший арбитраж, объявляется α -вычислителем, и именно ему вплоть до результатов следующего ПАВ предоставляется право реализовать конфигурацию КБО, соотнесенную с ДСК.

Кроме того, выбранный α -вычислитель осуществляет необходимое согласование действий всех остальных вычислителей.

На рис. 2 приведена развернутая структура предлагаемого алгоритма арбитража вычислителей, отражающая его место в обобщенных процедурах СУИ.

В результате арбитража вычислителей определяется и инициализируется α -вычислитель и окончательно определяется ДСК, в котором реализуются все последующие функции УИ. Все остальные вычислители получают сигнал на переход в "холодный" режим (в части функций УИ): СК этих вычислителей работают только на мониторинг готовности и прием необходимой сервисной информации от ДСК.

Защищенный обмен данными между вычислителями

В целях организации непротиворечивого обмена данными в процессе арбитража предусматриваются циркулирующие между вычислителями периодические информационные посылки (ИП), основанные на принципах формирования распределенного реестра, подобных технологии блокчейн [4, 5].

Каждый работоспособный вычислитель из группы (независимо от возможной занятости

другими функциями) после сбора необходимых данных формирует слово своего состояния, включающее идентификатор (ИД) и ИГ, которое отправляет другим вычислителям в составе общей посылки (распределенного реестра). Данные каждого вычислителя для исключения их повреждения или подмены подвергаются закрытию (средствами шифрования) таким образом, что каждому вычислителю для "записи" доступна только выделенная для него область ИП, а для "чтения" — все содержимое ИП.

Рис. 3 иллюстрирует указанную структуру общей посылки.

Применительно к введенным в табл. 1 ситуациям логика выбора вычислителей в пару описывается следующим образом.

1. Если ВСК обнаруживают отказ (ситуация № 2) или зависание (ситуация № 3) какого-либо вычислителя, он выводится из состава пары и заменяется вычислителем из резерва с наименьшим порядковым номером. В первый раз этой заменой будет вычислитель № 3. Выведенный вычислитель размещается последним в группе резерва с присвоением следующего по порядку (теперь виртуального) номера $k + 1$. ИП корректируется в части изменения его идентификатора и значения ИГ. В зависимости от политики разработчика выведенный вычислитель может либо считаться отказавшим с последующим выполнением восстановительных работ, либо подвергнуться оперативному обслуживанию, включая перезагрузку и/или переустановку программного обеспечения. Когда вычислители в группе резерва исчерпаны, манипулирование вычислителями осуществляется по их виртуальным номерам.

2. Если ВСК обнаруживают сбой или ошибку вычислителя (ситуация № 4), в зависимости от обстоятельств (место и характер ошибки) соответствующий вычислитель лишается статуса (α -вычислителя или претендента) с передачей функций другому вычислителю в паре или выводится из группы резерва по аналогии с предыдущей ситуацией (с присвоением соответствующего виртуального номера).

3. Вычислители выделенной пары (ситуации №№ 2—5) вступают в парный арбитраж вычислителей (ПАВ) по схеме, описываемой далее.

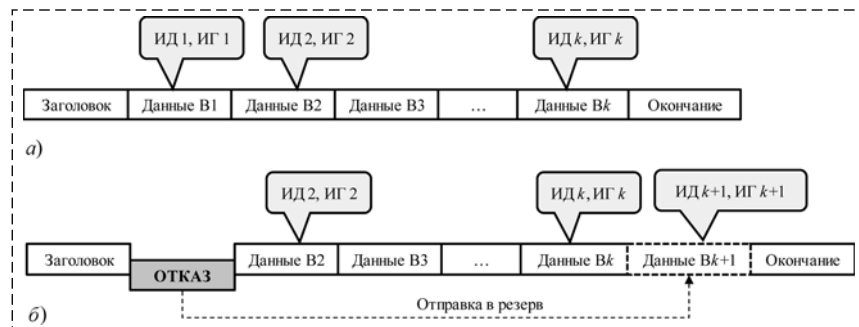


Рис. 3. Структура информационной посылки между вычислителями:

a — все вычислители исправны; *б* — отказ вычислителя № 1

Fig. 3. The structure of the information parcel among the computers:

a — all computers are working properly; *б* — computer's no. 1 failure

4. При наличии агрессии со стороны вычислителя (ситуация № 6), выражающейся в том, что неоднократные попытки лишения его статуса α -вычислителя не дают результата (вычислитель упорно настаивает на том, что он является победителем арбитража), он принудительно выводится из состава работающих с лишением статуса кандидата на конкурс, после чего инициируется новый цикл арбитража.

Парный арбитраж вычислителей

Процедура ПАВ¹ с окончательным выбором α -вычислителя, аналогично работе [12], заключается во взаимной перекрестной проверке (валидации) ДСК-конфигураций (через сравнение представляющих их СК), имеющейся в каждом вычислителе предварительно выделенной пары. Такая проверка позволяет расширить перечень учитываемых факторов, включив в него как возможные ошибки вычислений, так и искажения информации в структурах данных ДСК. Вероятность одновременных ошибок компонентов одинакового назначения, принадлежащих двум вычислителям пары, может быть минимизирована за счет технологической разнородности вычислителей и специального программного обеспечения управления избыточностью (СПО УИ).

На рис. 4 представлена схема парного арбитража вычислителей, на которой обозначены: ИД1 и ИД2 — идентификаторы СК пары, СКк1 и СКк2 — данные конфигураций, СКа1 и СКа2 — данные модулей арбитража, $D_{ПАВ}^1$ и $D_{ПАВ}^2$ — значения матриц предпочтений (рассматриваются ниже).

Идентичные модули арбитража в каждом из двух ДСК (один из них находится в α -претенденте) сопоставляют данные доминирующей конфигурации с данными эталонной (загрузочной) таблицы конфигураций, защищенной от изменений и хранимой отдельно.

Анализаторы в модулях арбитража формируют индексы предпочтения по совпадению (индекс равен 1) или несовпадению (индекс равен 0) конфигурации, сопоставленной ДСК, и эталонной для него конфигурации. В результате в каждом вычислителе формируется *матрица предпочтений*

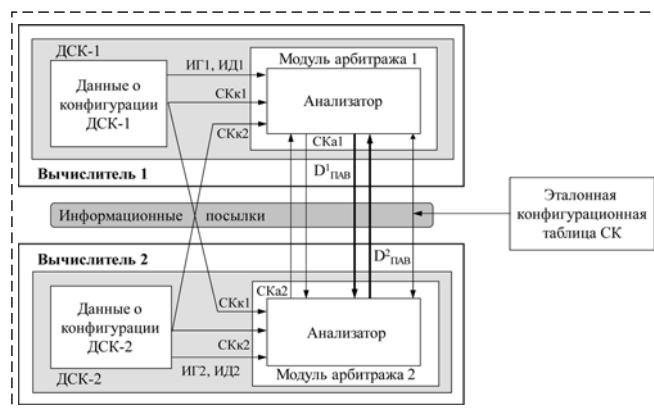


Рис. 4. Схема информационных посылок парного арбитража вычислителей

Fig. 4. Scheme of information parcels of paired arbitration of computers (PACP)

$$D_{ПАВ} = \begin{pmatrix} & \text{СКа1} & \text{СКа2} \\ \text{СКк1} & \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 \end{bmatrix} \\ \text{СКк2} & \begin{bmatrix} d_2^1 & d_2^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

где d_i^j — индекс предпочтения i -го вычислителя (отсутствие ошибок матрицы конфигураций в СКк i), определенный анализатором СКа j , размещенным в j -м вычислителе.

По значению матрицы предпочтений каждый вычислитель посредством анализатора ДСК-конфигурации выносит суждение о безошибочности или ошибочности реализуемой им конфигурации. Для этого необходимо войти в табл. 2 с полученным значением матрицы предпочтений $D_{ПАВ}$ и извлечь указание на предпочтение выбора α -вычислителя из второй графы.

Группы значений А и Б табл. 2 однозначно указывают вычислитель, обладающий предпочтением для назначения α -вычислителем, группа значений В допускает для этой цели любой вычислитель пары, невзирая на возможные ошибки анализаторов, а группа значений Г предписывает заменить (если достаточно ресурсов) оба вычислителя и повторить процедуру арбитража. Кроме того, такая замена проводится при условии несовпадения сформированных в модулях арбитража пары вычислителей матриц предпочтений $D_{ПАВ}^1$ и $D_{ПАВ}^2$.

В зависимости от политики разработчика отбракованные вычислители могут либо использоваться в арбитраже в составе других пар, либо окончательно выводиться из группы доступных вычислителей. Информация об ошибках анализаторов может регистрироваться для дальнейшего использования соответствующе-

¹ Раздел написан при участии И. Ф. Гамаюнова.

Таблица 2
Table 2

Значения матрицы предпочтений при ПАВ
Values of the preference matrix for PACP

Группа значений	Предпочтения выбора α -вычислителя	Ошибки анализатора СКa* ¹				
		СКa1		СКa2		Отсутствует
		Ложная "1"	Ложный "0"	Ложная "1"	Ложный "0"	
А	Вычислитель 1	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
Б	Вычислитель 2	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
В	Любой	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*2}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{*3}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*2}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^{*4}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^{*2}$
Г	Никакой	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{*5}$, $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^{*6}$, $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{*7}$				

*1 анализатор супервизора ошибается при сравнении конфигураций;

*2 неоднозначность: либо ошибки анализаторов отсутствуют, либо возможна ошибка только СКА1 или только СКА2 (выдача ложной "1" в каждом случае);

*3 возможна ошибка только СКА1 (выдача ложного "0");

*4 возможна ошибка только СКА2 (выдача ложного "0");

*5 неоднозначность: либо оба, либо один из вычислителей имеет ошибки как в конфигурационной матрице, так и в анализаторе ДСК одновременно;

*6 комбинации ошибок в конфигурационных таблицах и анализаторах вычислителей приводят к взаимной уступке предпочтения вычислителями пары;

*7 комбинации ошибок в конфигурационных таблицах и анализаторах приводят к присвоению предпочтения каждым вычислителем пары.

го вычислителя и для обслуживания системы в целом (перезагрузка, доработка ПО и пр.).

Таким образом, для победы в арбитраже вычислитель должен:

— обладать значением индекса готовности ИГ = 1;

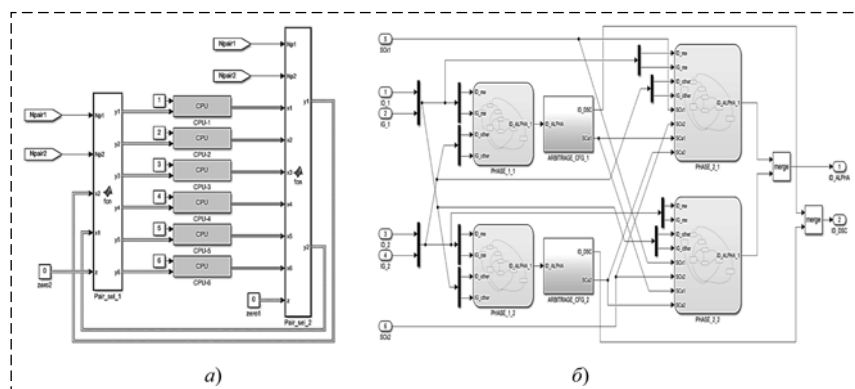


Рис. 5. Модель вычислительной системы:

а — внешний уровень; б — внутренний уровень (ПАВ)

Fig. 5. Computer system model:

а — external level; б — internal level (PACP)

— быть отобранным в пару участников арбитража (иметь дискриминационное преимущество не ниже второго в очереди);

— получить любое из значений матрицы предпочтений (при наличии дискриминационного преимущества в паре) из состава групп А или В в табл. 2;

— получить любое из значений матрицы предпочтений (при отсутствии дискриминационного преимущества в паре) из состава группы Б в табл. 2.

При этом в случае значений из группы В могут иметь место ошибки анализаторов вычислителей в паре, но это не отражается на результате проверки конфигурационных таблиц. Значения матрицы предпочтений из группы Г требуют замены пары вычислителей целиком.

Основное достоинство ПАВ заключается в полном исключении влияния ошибок анализаторов на выбор α -вычислителя с учетом правильного воспроизведения ДСК-конфигурации.

Методический пример

В целях демонстрации работы предложенного алгоритма арбитража моделировалась работа вычислительной системы из шести однотипных вычислительных устройств с одинаковым набором супервизоров конфигураций, объединенных в единую вычислительную сеть. Модель разработана с использованием системы моделирования алгоритмов конечных автоматов StateFlow, входящей в состав пакета численно-математического моделирования MATLAB¹. Структура модели показана на рис. 5.

На внешнем уровне модели (рис. 5, а) помимо блоков вычислителей (CPU) присутствуют блоки алгоритма выбора пары (PairSel). Внутренний уровень модели (рис. 5, б) реализован в каждом ВМ и имитирует процедуры ПАВ согласно рис. 2 и 4 (с обозначениями, соответствующими рис. 2).

Последовательно моделировались следующие типовые ситуации, иллюстрируемые рис. 6:

а) штатная работа комплекса: при начальном исправном состо-

¹ Лицензия № 989813.

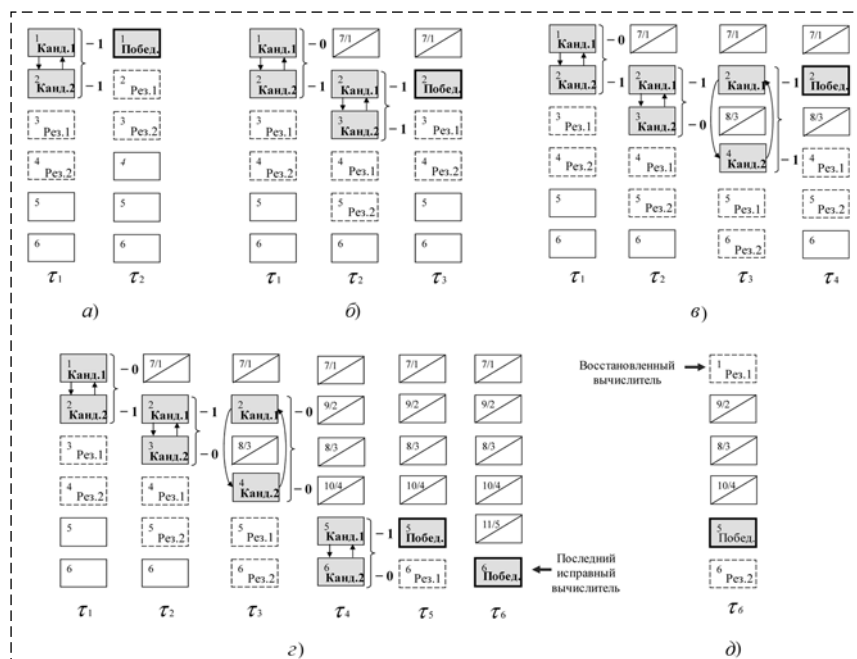


Рис. 6. Пример работы арбитража вычислителей

Fig. 6. An example of the computer's arbitration work

янии всех вычислителей в арбитраж вступают вычислители № 1 и № 2, в результате арбитража победу одерживает вычислитель № 1 (с меньшим номером), вычислители № 3 и № 4 попадают в "холодный" резерв;

б) *отказ одного вычислителя*: на определенном шаге работы комплекса имитируется отказ вычислителя № 1, при этом кандидаты в паре вычислителей меняются на № 2 и № 3, из них победу в арбитраже одерживает вычислитель № 2, в резерв переходят вычислители № 4 и № 5, вычислитель № 1 приобретает виртуальный номер 7, превышающий общее число вычислителей, что указывает на его отбракованное состояние¹;

в, г) *множественный отказ, постепенная деградация вычислительной системы*: имитация отказов нескольких вычислителей, выбор пары кандидатов и победителя происходит аналогично пункту (б) до гарантированного выявления победителя (пункт (в)) либо до последнего исправного вычислителя (пункт (г)) из состава системы;

д) *восстановленная работоспособность вычислителя*: в ходе работы алгоритма имитируется восстановление работы отказавшего ранее вычислителя № 1, при этом он возвращается в список вычислителей, которые имеют право

¹ Двойные обозначения номеров вычислителей на рис. 6 означают их виртуальные / порядковые номера.

выбора в кандидаты арбитража и постановки в резерв, что показывает рис. 6, д.

Пример демонстрирует порядок выбора вычислительных модулей в зависимости от их технического состояния и поддержание работоспособности вычислительной системы до последнего исправного вычислительного устройства.

Заключение

Рассмотрены особенности функционирования КБО с избыточной вычислительной системой, проанализированы характерные ситуации с отказами вычислителей и способы выхода из них. Предложен алгоритм организации арбитража вычислителей

многомашинной БИВС в рамках концепции управления избыточностью КБО на основе супервизорного подхода. Показаны способы формирования и передачи информационных посылок между вычислителями на основе формирования распределенного реестра. Детально описана процедура парного арбитража вычислителей, заключающаяся во взаимной перекрестной валидации ДСК-конфигураций предварительно выделенной пары и выборе значений матрицы предпочтений. Приведенный методический пример с фрагментом многомашинной вычислительной системы КБО демонстрирует особенности функционирования предлагаемого подхода в задаче поддержания работоспособности при деградации вычислителей.

Предложенный алгоритм парного арбитража может применяться для решения задач управления реконфигурацией разнородных вычислительных средств комплексов оборудования технических объектов.

Список литературы

1. **Парамонов П. В., Жаринов И. О.** Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Науч.-техн. вестн. инф. технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 1–16.
2. **Digital Avionics Handbook.** 3-d ed. / Ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. London, N. Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

3. Джанджава Г. И. Перспективные унифицированные комплексы бортового оборудования // Радиоэлектронные технологии. 2022. № 1. С. 31–36.
4. Саенко И. Б., Фабияновский И. Н. Подход к оперативной обработке неструктурированных данных в распределенных информационных системах на основе блокчейн-технологии // Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал, 2019. Т. 2, № 8. С. 8–13.
5. Перекальский И. Н., Кокин С. Е. Применение технологий распределенного реестра (blockchain) в электроэнергетических системах // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. Энергетика, 2020. Т. 20, № 1. С. 64–75.
6. George T. J. Introducing Blockchain Applications: Understand and Develop Blockchain Applications Through Distributed Systems. Berkeley, CA: Apress, 2022.
7. Сарапулов А. В., Уманский А. Б. Реконфигурирование бортовой вычислительной машины для повышения отказоустойчивости // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, выч. техника и информатика. 2017. № 38. С. 59–62.
8. Sollock P. Reconfigurable Redundancy — The Novel Concept Behind the World's First Two-Fault-Tolerant Integrated Avionics System // Avionics, Navigation, and Instrumentation. 2019. P. 243–246.
9. Kristoffk S., Balaz M., Malik P. Hardware redundancy architecture based on reconfigurable logic blocks with persistent high reliability improvement // Microelectronics Reliability. 2018. P. 38–54.

10. Фирсов Г. В. Метод обеспечения отказоустойчивости вычислений масштабируемых сетевых бортовых вычислительных систем // Тр. МАИ. 2006. Вып. 25. С. 1–13.
11. Каляев И. А., Мельник Э. В. Реконфигурируемые информационно-управляющие системы // Матер. пленар. засед. 5-й Росс. мультikonф. по пробл. управления. С-Пб.: Изд. ЦНИИ "Электроприбор", 2012. С. 36–37.
12. Мельник Э. В. Методы и программные средства повышения надежности сетевых информационно-управляющих систем на основе реконфигурации ресурсов вычислительных устройств: Дис. док. техн. наук. Таганрог: НИИ МВС и ФГАУ ВПО ЮФУ, 2014.
13. Агеев А. М., Бронников А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф. Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 59–69.
14. Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М., Гамаюнов И. Ф., Озеров Е. В., Шурман В. Н. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. пам. Н. Е. Жуковского: Матер. XVI Всерос. науч.-практ. конф. (11–12 апр. 2019, Москва). М.: ИД Акад. Жуковского, 2019. С. 17–33.
15. Агеев А. М., Буков В. Н., Шурман В. А. Алгоритмы управления избыточностью комплексов бортового оборудования подвижных объектов. Ч.1. Парный арбитраж конфигураций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 5. С. 263–273.

Algorithms for Managing the Redundancy of Onboard Equipment Complexes of Mobile Objects. Part 2. Paired Arbitration of Computers

A. M. Ageev, ageev_bbc@mail.ru,

MESC AF "Air Force Academy", Voronezh, 394064, Russian Federation,

V. N. Bukov, v_bukov@mail.ru,

Research institute of aviation equipment, Zhukovsky, 140180, Russian Federation,

V. A. Shurman, vshurman@rpkb.ru,

Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, Ramenskoye, 140103, Russian Federation

Corresponding author: Ageev A. M., PhD. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, 394064, Russian Federation, e-mail: ageev_bbc@mail.ru

Accepted on January 25, 2022

Abstract

The article solves the problem of operative selection of the redundant onboard equipment complex components configuration of the suitable in the current operating conditions in the interests of ensuring high fault tolerance of the complex, as well as achieving other operational and technical characteristics. The basis of the redundancy management system of the complex consists of configuration supervisors — as program subjects according to the number of its competitive configurations of heterogeneous and nonuniform equipment worked out in advance. The choice of the preferred configuration is proposed to be carried out by performing multi-level arbitration, which includes two phases of paired arbitration of computers and paired arbitration of configuration. It is proposed to include the means of both types of arbitration in each configuration supervisor, which ensures its self-sufficiency when participating in a competitive selection. The second part of the article is devoted to the computer's arbitration for the implementation of redundancy management functions. The approach is applicable to a computing environment with many comparable computing devices and contains 2 phases. In the first phase, a preliminary selection of a competing pair of computers — as applicants for the implementation of redundancy management functions in them is carried out. In the break between the phases, the pair computers implement the procedures for pair arbitration of configurations given in the first part of the article. In the second phase, the final choice of the α -computer is made, in which the supervisor who won the arbitration will be implemented. In order to achieve the maximum possible centralization of selection procedures and, as a consequence, the exclusion of "bottlenecks" in terms of reliability of places, additionally proposed: the organization of secure data exchange between computers based on distributed registry technology; the procedure of paired arbitration of computers, consisting in mutual cross-validation of dominant supervisors of a pre-allocated pair by comparing preference matrices, including information parcels of arbitration objects. A methodological example that demonstrates the features of the system functioning in the conditions of computers degradation is given. The proposed approach can be used to solve the problems of reconfiguration control of heterogeneous computing facilities of technical objects on-board equipment complexes.

Keywords: fault-tolerant system, redundancy management, paired arbitration of computers, distributed registry, preference rule, preference matrix

For citation:

Ageev A. M., Bukov V. N., Shurman V. A. Algorithms for Managing the Redundancy of Onboard Equipment Complexes of Mobile Objects. Part 2. Paired Arbitration of Computers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 327–336 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.23.327-336

References

1. **Paramonov P. V., Zharinov I. O.** *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 1–17 (in Russian).
2. **Spitzer C. R., Ferrell U., Ferrell T.** ed. *Digital Avionics Handbook*, London, N. Y., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
3. **Dzhandzhgava G. I.** *Radioelektronnye Tekhnologii*, 2022, no. 1, pp. 31–36 (in Russian).
4. **Saenko I. B., Fabianovskii I. N.** *Trudy TSNIIS. SPb Branch*, 2019, vol. 2, no. 8, pp. 8–13 (in Russian).
5. **Perekal'skii I. N., Kokin S. E.** *Vestn. Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Ehnergetika*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 64–75 (in Russian).
6. **George T. J.** *Introducing Blockchain Applications: Understand and Develop Blockchain Applications Through Distributed Systems*, Berkeley, CA, Apress, 2022.
7. **Sarapulov A. V., Umanskii A. B.** *Vestn. Tomskogo gos. un-ta. Upravlenie, vych. tekhnika i informatika*, 2017, no. 38, pp. 59–62 (in Russian).
8. **Sollock P.** Reconfigurable Redundancy — The Novel Concept Behind the World's First Two-Fault-Tolerant Integrated Avionics System, *Avionics, Navigation, and Instrumentation*, 2019, pp. 243–246.
9. **Kristoffk S., Balaz M., Malik P.** Hardware redundancy architecture based on reconfigurable logic blocks with persistent high reliability improvement, *Microelectronics Reliability*, 2018, pp. 38–54.
10. **Firsov G. V.** *Tr. MAI*, 2006, no. 25, pp. 1–13.
11. **Kalyaev I. A., Mel'nik EH. V.** *Mater. plenar. zased. 5-i Ross. mul'tikonf. po probl. upravleniya*. S-Pb., Publishing house of TSNII "EhlektropriboR", 2012, pp. 36–37 (in Russian).
12. **Mel'nik EH. V.** Methods and software tools for improving the reliability of network information and control systems based on the reconfiguration of computing device resources: Diss. Doct. Techn. Sci. Taganrog: *NII MVS i FGAV VPO YUFU*, 2014 (in Russian).
13. **Ageev A. M., Gamayunov I. F., Bronnikov A. M., Bukov V. N.** Supervisory control method for redundant technical systems, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 410–419 (in Russian).
14. **Bukov V. N., Bronnikov A. M., Ageev A. M., Gamayunov I. F., Ozerov E. V., Shurman V. N.** *Nauch. chteniya po aviatsii, posvyashch. pam. N. E. Zhukovskogo: Mater. XVI Vseros. nauch.-prakt. konf.* (11–12 apr. 2019, Moscow), Moscow, ID Akad. Zhukovskogo, 2019, pp. 17–33 (in Russian).
15. **Ageev A. M., Bukov V. N., Shurman V. A.** Algorithms for managing the redundancy of onboard equipment complexes of mobile objects. Part 1. Paired arbitration of configurations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 5, pp. 263–273 (in Russian).

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: **+7(499) 270 16 52**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 28.03.2022. Подписано в печать 16.05.2022. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Заказ МН622. 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 "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru