

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 23

2022

№ 1

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.п.с.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

Врачевский С. А., Чугина Ю. В., Фуртат И. Б., Коновалов Д. Е. Развитие метода инвариантных эллипсоидов для проектирования разреженных регуляторов3

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И., Зеленков А. В. Нейросетевой алгоритм настройки ПИ регулятора в системе управления очистного комбайна13

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Филаретов В. Ф., Губанков А. С., Горностаев И. В. Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I23

Рыжова Т. П. Метод классификации рабочей зоны мобильного робота на основе анализа трехмерного облака точек31

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА,
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Karsaev O. V. A Conceptual Model of Remote Sensing Data Routing in the Grouping of Communication Satellites of a Multi-Satellite Space System37

Агеев А. М. Принципы хранения и мониторинга информации о конфигурациях в задаче управления избыточностью комплекса бортового оборудования45

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://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 23

2022

No. 1

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

Vrazhevsky S. A., Chugina J. V., Furtat I. B., Konovalov D. E. Optimization of Invariant Ellipsoid Technique for Sparse Controllers Design 3

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

Shprekher D. M., Babokin G. I., Zelenkov A. V. Neural Network Algorithm for Adjusting the PI Controller in the Shearer Control System 13

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Freedom. Part I 23

Ryzhova T. P. Method of Classification the Mobile Robot Workspace Based on the Analysis of a 3D Point Cloud 31

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Karsaev O. V. A Conceptual Model of Remote Sensing Data Routing in the Grouping of Communication Satellites of a Multi-Satellite Space System 37

Ageev A. M. Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing 45

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

С. А. Вражевский^{1, 2}, канд. техн. наук, науч. сотр., vrazhevskij.s@gmail.com,

Ю. В. Чугина¹, канд. техн. наук, науч. сотр., yofrid@mail.ru,

И. Б. Фуртат¹, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., cainenash@mail.ru,

Д. Е. Коновалов², магистрант, d.e.konovalev@mail.ru,

¹ИПМаш РАН, Санкт Петербург,

²Университет ИТМО, Санкт Петербург

Развитие метода инвариантных эллипсоидов для проектирования разреженных регуляторов*

Рассматривается метод синтеза линейных регуляторов с разреженными матрицами обратных связей для управления объектами в условиях возмущений. Алгоритм поиска разреженных матриц основан на методе инвариантных эллипсоидов и формулируется в виде решения системы линейных матричных неравенств с дополнительными ограничениями. Предложен специальный набор оптимизационных условий, который для возмущенной системы обеспечивает минимизацию перерегулирования и выбросов в переходных процессах возмущенной замкнутой системы одновременно с минимизацией ошибки в установившемся режиме. Предложенный метод также предполагает возможность минимизации как строчной нормы матрицы обратных связей, так и столбцовой, с сохранением свойств робастности, что позволяет решать задачу разреженного управления (под разреженным управлением понимается линейный регулятор с разреженной матрицей обратных связей). Эффективность работы предложенной схемы управления подтверждена результатами компьютерного моделирования и сравнения с некоторыми аналогами.

Ключевые слова: выпуклая оптимизация, метод инвариантных эллипсоидов, разреженное управление, линейные регуляторы

Введение

Метод инвариантных эллипсоидов. Метод инвариантных эллипсоидов предлагает несколько иной взгляд на задачу обеспечения устойчивости, чем известные и часто используемые классические подходы. В отличие от большинства методов управления, для которых достаточным условием успешной реализации является обеспечение асимптотической устойчивости или устойчивости по Ляпунову (фундаментальных свойств с точки зрения теории автоматического управления), метод инвариантных эллипсоидов позволяет оттолкнуться от задачи обеспечения требуемого качества переходных процессов для замкнутой

системы, что гарантирует требуемое качество сигналов в установившемся режиме. Данный подход также позволяет управлять системами с ограничениями по состоянию без дополнительных надстроек в алгоритме управления. Естественной областью применения метода инвариантных эллипсоидов являются различные оптимизационные задачи в качестве альтернативы классическим методам, таким как, например, линейный квадратичный регулятор, градиентные методы или H_∞ . Ключевой идеей метода является переход от традиционной задачи обеспечения устойчивости к задаче выпуклой оптимизации, которая, в свою очередь, может быть решена с помощью методов вариационного исчисления и теории линейных матричных неравенств (linear matrix inequalities — LMI) [1–4].

Разреженное управление. Результаты, представленные в данной статье, основаны на алгоритмах, опубликованных в работах [1] и [5], каждая из которых предлагает свою вариацию метода инвариантных эллипсоидов. В статье

*Основной результат получен за счет гранта Президента РФ (проект № МД-1054.2020.8) в ИПМаш РАН. Задача выпуклого программирования выполнена за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00610) в ИПМаш РАН. Численные исследования выполнены за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00246) в ИПМаш РАН.

[1] впервые сформулирована и решена задача "разреженного" управления на базе данного метода, т. е. задача поиска матрицы линейных обратных связей с минимальным возможным рангом. Результат статьи [1] развивает идею, сформулированную ранее в работе [6] и более подробно исследованную в работах [7–9].

Важность свойства разреженности в обратной связи можно объяснить двумя факторами. Во-первых, при минимизации столбцовой нормы матрицы обратной связи в схеме управления становится возможным использовать минимальное число измерительных устройств. Во-вторых, при минимизации строчной нормы матрицы обратной связи обеспечивается минимизация необходимого числа исполнительных (управляющих) устройств. Оба свойства, если они достижимы при синтезе регулятора, удешевляют стоимость системы и позволяют повысить отказоустойчивость и качество регулирования за счет уменьшения структурной сложности. Таким образом, объясняется практический интерес к регуляторам, основанным на работе [1]. Аналогичной задаче, наряду с результатом [1], посвящены работы [10, 11].

Различные алгоритмы на основе метода инвариантного эллипсоида также представлены в работах [12–14]. В статье [12] задача разреженного управления решена для возмущенных объектов. Результат, полученный в [12], модифицируется в работе [5] двумя способами. Во-первых, считается, что траектории замкнутых систем способны превышать границы эллипсоида на некоторую величину, зависящую от величины возмущений. Таким образом, робастность метода инвариантного эллипсоида заключается в том, что траектории замкнутой системы остаются внутри эллипсоида с некоторой точностью при функционировании системы в условиях возмущений. Такое свойство непосредственно требует учитывать влияние возмущений на переходные процессы замкнутой системы и минимизировать их воздействие.

Другая идея в работе [5] заключается в изменении условий минимизации в LMI, которые вычисляют матрицу обратной связи. В работе предлагается аппроксимировать эллипсоид сферой с диаметром, равным норме вектора начальных условий, а не минимизировать его объем. Основная идея заключается в том, чтобы предотвратить синтез регулятора, который допускает эллипсоид с высокой непропорциональностью полуосей, что, в свою очередь,

способствует появлению перерегулирования в переходных процессах.

Основные результаты статьи. В данной работе предложен новый подход к синтезу разреженных регуляторов с оптимизацией переходных процессов для возмущенных линейных систем. Отличия предлагаемого метода от представленных в работах [1, 5, 12, 15, 16] заключаются в следующем. В отличие от работ [12, 15, 16] добавлено условие минимизации наибольшей полуоси инвариантного эллипсоида, что приводит к минимизации перерегулирования и выбросов в переходных процессах. Одновременно с этим ошибка в установившемся режиме минимизируется по аналогии с работой [5]. Однако в отличие от статьи [5] условия минимизации формулируются таким образом, что позволяют конструировать эллипсоид, наибольшая полуось которого определяется начальными условиями. Дополнительно регулятор может быть приведен к разреженному виду методом, предложенным в статье [1].

1. Постановка задачи

◀ Модель объекта

Объект описывается линейной непрерывной моделью следующего вида:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Df(t), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times l}$; $x(t) \in R^n$ — вектор состояния; x_0 — вектор начальных условий; $u(t) \in R^m$ — вектор управляющих сигналов; $f(t) \in R^l$ — неизвестное возмущение.

Полагается, что матрицы A , B , D известны и пара (A, B) — управляема. Вектор состояния $x(t)$ полностью доступен измерению. Функция возмущений $f(t)$ ограничена известной величиной γ : $\|f(t)\| \leq \gamma$.

◀ Цель управления

Основной целью управления является решение задачи стабилизации возмущенного объекта с минимизацией выбросов в переходных процессах

$$\|x(t)\| \leq \varepsilon, \quad t \geq 0, \quad (2)$$

одновременно с минимизацией размера ошибки в установившемся режиме

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\sup \|x(t)\|) \leq \delta, \quad (3)$$

где $\varepsilon > 0$ — точность регулирования в переходном режиме, оценка которой будет получена в процессе синтеза регулятора; $\delta > 0$ — некоторая достижимая точность стабилизации в установившемся режиме.

Второстепенная задача заключается в построении разреженного регулятора для достижения условий (1), (2) в целях минимизации числа используемых измерительных либо исполнительных устройств. Без ограничения общности можно рассматривать задачу минимизации строчной нормы матрицы обратных связей, тогда для линейного регулятора задачу разреженного управления можно представить в виде

$$u(t) = Kx(t) : \|K\|_{r1} \rightarrow \min. \quad (4)$$

2. Основной результат

Сформируем закон управления в виде линейного статического регулятора

$$u(t) = Kx(t), \quad (5)$$

где $K \in R^{m \times n}$ — некоторая матрица линейных обратных связей, выбор которой гарантирует выполнение целевых условий (2)—(4), при этом матрица $A + BK$ является гурвицевой. Таким образом, замкнутая система

$$\dot{x}(t) = (A + BK)x(t) + Df(t) \quad (6)$$

будет устойчивой в силу ограниченности $f(t)$. Определим способ расчета матрицы K .

Для решения основной задачи использован метод инвариантных эллипсоидов и метод функции Ляпунова. В общем виде метод инвариантных эллипсоидов заключается в построении эллипсоидальной аппроксимации некоторого подмножества в R^n , содержащего решения замкнутой системы (6), по заранее выбранному оптимизационному критерию. Такое подмножество может быть найдено через решение линейных матричных неравенств с помощью набора линейных ограничений, в которых учитываются начальные условия объекта и критерии устойчивости замкнутой системы, определенные с помощью функции Ляпунова. В данной работе искомый набор ограничений на решения замкнутой системы формируется исходя из условий (2)—(4).

Так, для минимизации перерегулирования и выбросов в переходных процессах одно из

требований к мажорирующему эллипсоиду формулируется как минимизация наибольшей из его полуосей. В работах [5, 12, 15], также посвященных повышению качества переходных процессов возмущенных систем через метод инвариантных эллипсоидов, для минимизации выбросов используются другие критерии. В статьях [12, 15] осуществляется минимизация следа матрицы эллипсоида, в работе [5] предлагается обеспечить близость формы инвариантного эллипсоида к шару: $\|P - I\| \rightarrow \min$, где P — искомый эллипсоид, I — единичная матрица. Сравнение эффективности всех трех подходов вместе с некоторыми комментариями предложены в последней части работы.

Для минимизации ошибки δ в установившемся режиме используется оптимизация с использованием настраиваемого параметра [5]. Сформулируем основной результат в виде следующей теоремы.

Теорема. Рассмотрим систему управления, состоящую из объекта (1) и закона управления (5). Если для заданного числа $\alpha > 0$ найдутся положительно определенная матрица $P > 0$ и параметр $\beta > 0$ такие, что

$$\beta + \lambda_{\max}(P) + H[m - 2]\|Y\|_{r1} \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I & x_0^T \\ x_0 & P \end{bmatrix} \geq 0;$$

$$\begin{bmatrix} PA^T + AP + Y^T B^T + BY + \alpha P & D \\ D^T & -\beta I \end{bmatrix} \leq 0,$$

тогда траектории замкнутой системы (6), состоящей из объекта управления (1) и закона управления (5), будут удовлетворять целевым условиям (2)—(3) и не будут покидать эллипсоид вида

$$E_x = \{x(t) : x^T(t)P^{-1}x(t) \leq 1\}, \quad P > 0, \quad (8)$$

при выборе $K = \hat{Y}\hat{P}^{-1}$, где $\hat{Y}$ и $\hat{P}$ — решения (7).

Доказательство.

1. Ограниченность траекторий замкнутой системы

Эллипсоид вида (8) инвариантен по $x(t)$, если $x(t) \in E_x$ для $t \geq 0$. Для того чтобы сформировать аппроксимированное подмножество (8), покрывающее $x(t)$, необходимо, во-первых, чтобы начальные условия объекта принадлежали эллипсоиду (8), что интерпретируется в виде условия $x_0^T P^{-1} x_0 \leq 1$. Данное условие приводимо

к виду $I - x_0^T P^{-1} x_0 \geq 0$, где правую часть можно рассмотреть как дополнение Шура к матрице P в линейном матричном неравенстве

$$\begin{bmatrix} I & x_0^T \\ x_0 & P \end{bmatrix} \geq 0, \quad (9)$$

которое, в свою очередь, становится первой частью ограничений и гарантирует включение начальных условий в множество, ограниченном эллипсоидом (8).

2. Асимптотическая устойчивость

Асимптотическая устойчивость следует из условия

$$\dot{V}(x(t)) + 2\alpha V(x(t)) - \beta f^T(t)f(t) \leq 0, \quad (10)$$

где $\alpha > 0$, $\beta > 0$ и $V(x(t))$ — функционал Ляпунова в виде вышеупомянутого эллипсоида

$$V(x(t)) = x^T(t)Qx(t), \quad (11)$$

где $Q = P^{-1}$. Производная (11) вдоль траекторий системы (6) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dV(x)}{dx} &= x^T(t)(A + BK)^T Qx(t) + \\ &+ x^T(t)Q(A + BK)x(t) + \\ &+ f^T(t)D^T Qx(t) + x^T(t)QDf(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Принимая во внимание соотношения (11) и (12), а также переписывая неравенство (10) в матричной форме, получим:

$$z^T(t)\Phi z(t) \leq 0, \quad (13)$$

где $z^T(t) = [x(t) \ f(t)]$,

$$\Phi = \begin{bmatrix} (A + BK)^T Q + Q(A + BK) + \alpha Q & QD \\ D^T Q & -\beta I \end{bmatrix}.$$

Неравенство (13) нелинейно по своим переменным. Чтобы уйти от нелинейности, рассмотрим следующее эквивалентное условие:

$$z^T(t)M\Phi Mz(t) \leq 0,$$

где $M = \begin{bmatrix} Q^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} > 0$. Вычисляя произведение матриц $M\Phi M$ и введя обозначения $Y = KP$ с учетом $P = Q^{-1}$, получим:

$$\begin{bmatrix} PA^T + AP + Y^T B^T + BY + \alpha P & D \\ D^T & -\beta I \end{bmatrix} \leq 0. \quad (14)$$

Если α — заданная константа, то неравенство (14) является линейным. Разрешимость (14) гарантирует асимптотическую устойчивость замкнутой системы (1), (5).

3. Выполнение целевых условий

Для обеспечения целевого условия (3) оценим точность стабилизации δ через решение неравенства (10):

$$V(x(t)) \leq V(x(0))e^{-\alpha t} + \frac{\beta f^2(t)}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}).$$

Принимая во внимание известную верхнюю границу возмущения, для $t \rightarrow \infty$ получаем следующую оценку:

$$V(x(t)) \leq \frac{\beta \gamma^2}{\alpha}.$$

Так как (11) может быть ограничено снизу как

$$V(x(t)) \geq \lambda_{\min}(P^{-1})\|x(t)\|^2,$$

то δ в выражении (3) можно оценить как

$$\delta = \sqrt{\frac{\beta \gamma^2 \lambda_{\min}(P)}{\alpha}}. \quad (15)$$

Заметим, что $\lambda_{\min}(P)$ — квадрат наименьшей полуоси эллипсоида. Его минимизация потенциально приводит к увеличению диаметра эллипсоида, т. е. его наибольшей полуоси, что является нежелательным свойством. Поэтому, предполагая, что γ задано заранее и фиксируя α как константу, можно минимизировать область диссипативности за счет выбора следующего функционала качества:

$$J_e = \beta \rightarrow \min. \quad (16)$$

Для выполнения цели управления (2) эллипсоид минимального диаметра может быть построен путем решения задачи минимизации собственных значений

$$J_r = \lambda_{\max}(P) \rightarrow \min, \quad (17)$$

где $\lambda_{\max}(P)$ — квадрат наибольшей полуоси эллипсоида.

4. Разреженное управление

Для достижения целевого условия (4) воспользуемся теоремой 1 из работы [1]. Используя обозначения, введенные в настоящей работе, теорему можно сформулировать следующим образом.

Если задача

$$\|Y\|_{r1} \rightarrow \min \text{ при условии } K = YP^{-1},$$

где $Y \in R^{m \times n}$, $m < n$, $K \in R^{m \times n}$, $P \in R^{n \times n}$, разрежима, то существует такое решение, которое имеет не более m ненулевых строк.

Здесь используется r_1 -норма

$$\|Y\|_{r1} = \sum_{i=1}^m \max_{1 \leq j \leq n} |y_{ij}|.$$

Доказательство можно найти в работе [1].

Поскольку в данном случае существуют и другие ограничения, помимо упомянутого в теореме, то не гарантируется, что найдется разреженное решение. Кроме того, можно получить не совсем нулевые строки, т. е. получить элементы, значения которых на несколько порядков меньше, чем в других строках. При обнулении таких значений (ниже определенного порога) и выполнении условия гурвицевости матрицы $A + BK$ получается разреженное управление.

Если матрица регулятора состоит только из одной строки, то нет места для оптимизации и нет необходимости использовать это дополнение. Таким образом, функционал качества для максимизации разреженности формулируется следующим образом:

$$J_{sp} = H[m - 2] \|Y\|_{r1} \rightarrow \min, \quad (18)$$

где $H[\cdot]$ — единичная шаговая функция

$$H[k] = \begin{cases} 0, & k < 0, \\ 1, & k \geq 0. \end{cases}$$

При $m = 1$ получим $H[m - 2] = 0$. Полный набор оптимизационных условий (16)–(18) для решения задачи выпуклой оптимизации можно привести к виду

$$J_e + J_r + J_{sp} \rightarrow \min. \quad (19)$$

Теорема доказана.

3. Задача выпуклого программирования

Конечная форма задачи выпуклого программирования может быть сформулирована двумя способами. Первый способ сформулирован в *Теореме* и позволяет быстрее рассчитать матрицу регулятора K . Данный способ

полностью достаточен для случая $m = 1$. Второй, предложенный ниже, позволяет достичь большей разреженности или лучшей точности в стационарном режиме, но выполняется в три этапа. Этот подход аналогичен тому, который использовался в работе [1].

Замечание. Решим редуцированную оптимизационную задачу

$$J_e + J_r \rightarrow \min \quad (20)$$

с учетом (9), (14) и $\beta > 0$, с переменными P , Y , β и фиксированным $\alpha > 0$. Предположим, что β — это решение (20). Теперь установим, какие строки можно игнорировать в законе управления без потери устойчивости путем решения следующей задачи:

$$J_{sp} \rightarrow \min, \quad (21)$$

с учетом (9), (14), $\beta > 0$ и $\beta \leq \hat{\epsilon}\beta$, с переменными P , Y , β и фиксированным $\alpha > 0$, $\epsilon > 1$. Если на данном шаге получается разреженная матрица Y , то необходимо решить задачу (19), дополнительно уточнив фиксированные нулевые строки в Y . Если задача выполнима, то цели, определенные в разделе "Постановка задачи", удовлетворяются для системы (6).

Задачи (17), (21) являются выпуклыми, так как функционалы являются суммами положительных переменных и нормы.

4. Моделирование

Качество работы предложенного алгоритма иллюстрируется серией результатов компьютерного моделирования, выполненных в среде MATLAB. Задачи выпуклого программирования решаются с помощью CVX [1, 2] и с помощью решателя SeDuMi.

◀ Решение основной задачи

Рассмотрим объект третьего порядка и $m = 1$. Предположим, что объект описывается моделью (1), где матрицы имеют следующие числовые значения:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1,259 & 1,623 & -1,492 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Начальные условия $x(0)^T = [1,654 \ 0,529 \ -1,61]$, возмущение моделируется с помощью функции $f(t) = 0,5 + 0,5\cos(t)$.

Закон управления вычисляется, согласно *Теореме*, путем решения задачи линейных матричных неравенств (9), (14) с соблюдением набора оптимизационных условий (19) при $\alpha = 0,01$. Вектор коэффициентов обратной связи имеет следующий вид:

$$K = [-1416 \quad -2546 \quad -3122].$$

Эллипсоидная матрица выглядит следующим образом:

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} 4,465 & -0,744 & -1,417 \\ -0,744 & 2,577 & -1,76 \\ -1,417 & -1,76 & 3,572 \end{bmatrix}.$$

На рис. 1 показана траектория системы внутри мажорирующего эллипсоида. Траектория сходится в область с $\delta = 0,006$.

Как можно заметить, эллипсоид ориентирован таким образом, что наиболее удаленная от положения равновесия точка траектории совпадает с наибольшей осью эллипсоида. Результаты компьютерного моделирования для различных случайно заданных матриц объекта показывают, что эта точка находится в малой окрестности положения равновесия. Таким образом, значение максимального отклонения в переходных процессах не может превосходить значение начальных условий. Траектория сходится к устойчивому состоянию с точностью $\delta = 0,006$.

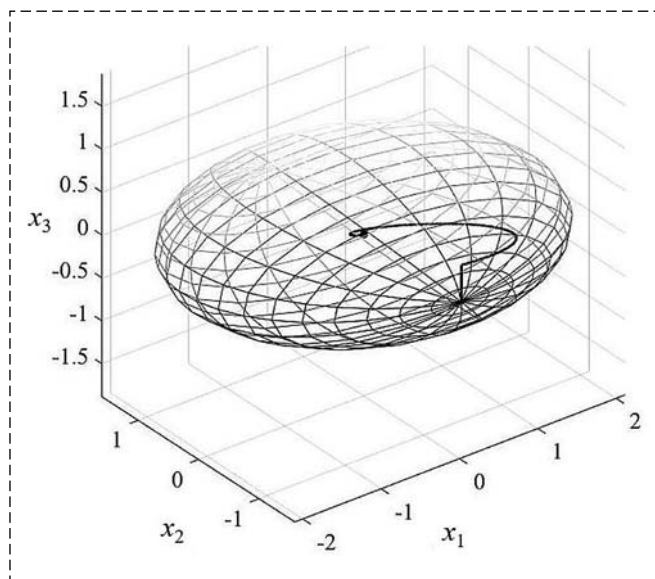


Рис. 1. Фазовая траектория системы и мажорирующий эллипсоид

Fig. 1. Phase trajectory of the system and the majorizing ellipsoid

« Разреженное управление

Рассмотрим разомкнутый неустойчивый объект, определенный моделью (1) со следующими матрицами:

$$A = \begin{bmatrix} -0,886 & 1,86 & 1,83 \\ 0,188 & -1,37 & -0,06 \\ 1,83 & 1,882 & 1,201 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -1,433 & 1,169 & -1,857 \\ -0,313 & 1,838 & 1,397 \\ 1,663 & 0,623 & 1,736 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0,715 \\ 1,031 \\ 0,973 \end{bmatrix}.$$

Зададим $x(0)^T = [-0,431 \quad 0,622 \quad -1,315]$. Возмущение моделируется с использованием той же функции, что и в предыдущем примере.

Закон управления находится с использованием метода, определенного в *Замечании*. Параметры $\alpha = 0,01$, $\varepsilon = 1,2$. После второго шага значения Y сравниваются по уровню 0,1. Получаем матрицу обратной связи в виде

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -0,665 & -0,621 & -1,779 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Условие гурвицевости матрицы $A + BK$ выполнено, поэтому замкнутая система устойчива. Фактическое число необходимых приводов равно единице. Матрица эллипсоида имеет вид

$$P = \begin{bmatrix} 1,58 & 0,112 & 0,191 \\ 0,112 & 1,745 & -0,694 \\ 0,191 & -0,694 & 1,873 \end{bmatrix}.$$

На рис. 2 показана фазовая траектория внутри охватывающего эллипсоида с точностью $\delta = 0,43$ в установившемся режиме.

Для сравнения рассчитаем закон управления для того же объекта, используя утверждение *Теоремы* с пороговым значением $5 \cdot 10^{-3}$ для элементов Y . Тогда

$$K = \begin{bmatrix} 0,568 & 2,636 & 0,525 \\ -4,962 & -11,056 & -4,754 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Как видно, получена "менее разреженная" матрица, чем в предыдущем случае. Установившаяся погрешность в данном случае составляет $\delta = 0,87$. Фазовая траектория показана на рис. 3.

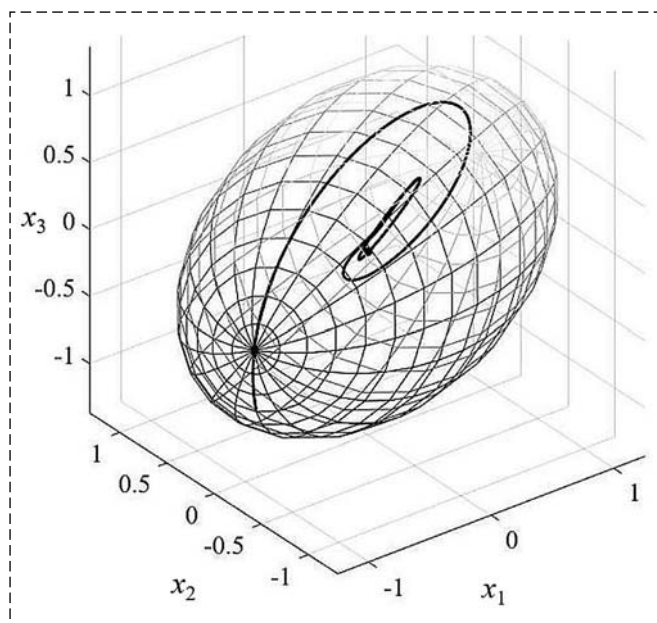


Рис. 2. Фазовая траектория замкнутой системы с разреженным регулятором (см. Замечание)

Fig. 2. The phase trajectory of the closed-loop system with a sparse controller (see Remark)

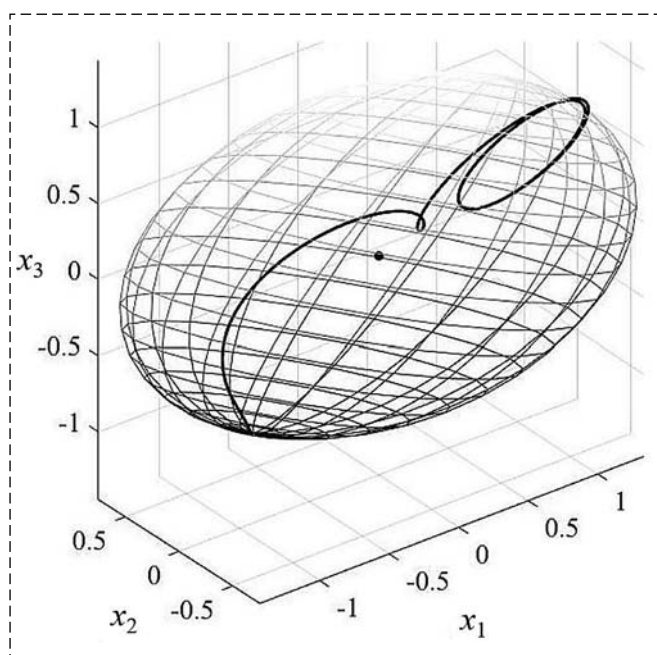


Рис. 3. Фазовая траектория замкнутой системы с разреженным регулятором (см. Теорему)

Fig. 3. The phase trajectory of the closed-loop system with a sparse controller (see Theorem)

◀ Сравнение с аналогами

Сравним результаты, полученные в работах [5] и [12], с результатом работы предложенного алгоритма. Для визуального сравнения результатов рассмотрим объект с размерностью $n = 2$. Матрицы имеют следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1,259 & 1,623 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Пусть $x(0)^T = [-1,492 \ 1,653]$. Возмущение используется такое же, как и в предыдущем примере. Закон управления вычисляется так же, как и в первом примере. Матрица обратной связи определяется как

$$K = [-958 \ -1817].$$

Матрица эллипса выглядит следующим образом:

$$P = \begin{bmatrix} 3,132 & -1,649 \\ -1,649 & 3,472 \end{bmatrix}.$$

Сравним предложенную в данной работе систему управления с системой, рассчитанной для того же объекта в соответствии с алгоритмом работы [5]. Главное отличие предложенного алгоритма от результата статьи [5] заключается в том, что в работе [5] используется минимизация нормы $\|P - I\|_1$ вместо (17) для оптимизации переходных процессов. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Полученные показатели качества представлены в таблице. Предложенный алгоритм в данном примере достигает большей точности за значительно меньший промежуток времени, чем алгоритм, предложенный в работе [5].

Теперь сравним с алгоритмом работы [12]. Для системы (1) данный алгоритм может быть

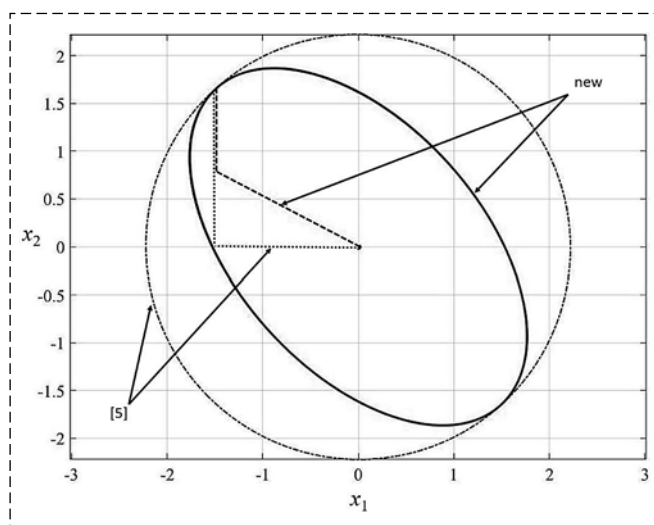


Рис. 4. Фазовые траектории и инвариантные эллипсоиды замкнутых систем: результат [5] и предложенный регулятор
Fig. 4. Phase trajectories and invariant ellipsoids of the closed-loop systems: result [5] and the proposed controller

описан в виде следующей задачи выпуклого программирования:

$$\text{tr}(P + Z) \rightarrow \min,$$

где $\text{tr}(\cdot)$ — след матрицы и $Z = Z^T \in R^{m \times m}$, с учетом условия (9), а также

$$AP + PA^T + \alpha P + BY + Y^T B^T + \frac{1}{\alpha} DD^T \leq 0$$

и

$$\begin{bmatrix} Z & Y^T \\ Y & P \end{bmatrix} \geq 0$$

с переменными P, Y, Z и фиксированным $\alpha > 0$.

Заметим, что в работе [12] задача управления формулируется для системы, замкнутой по выходу, с функционалом качества вида $\text{tr}(CPC^T + B_2 Z B_2^T)$, где C — выходная матрица, которая в нашем случае является единичной.

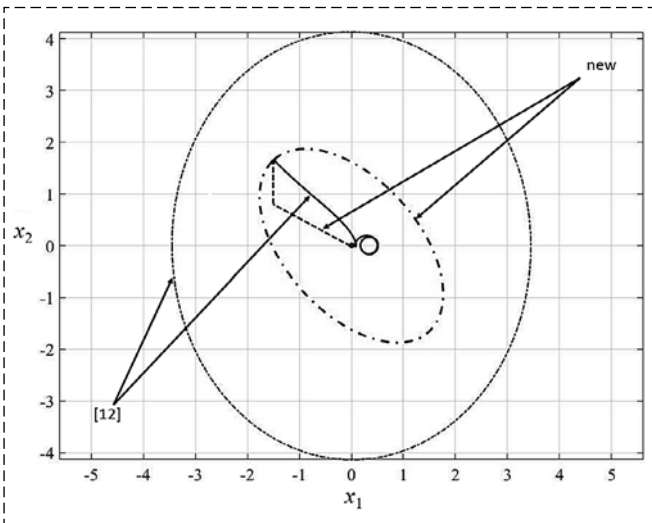


Рис. 5. Фазовые траектории и инвариантные эллипсоиды замкнутых систем: результат [12] и предложенный регулятор
Fig. 5. Phase trajectories and invariant ellipsoids of closed-loop system systems: result [12] and the proposed controller

Параметры в алгоритмах управления

The control law parameters

Параметр	Алгоритм		
	Предложенный в данной работе	Алгоритм из работы [5]	Алгоритм из работы [12]
δ	$2 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,32
$\text{tr}(P)$	6,6	9,87	29
ΔP	$2 \cdot 10^{-6}$	0,21	$8 \cdot 10^{-3}$
$T, \text{с}$	5,6	355	—

Использование матриц B_2 и Z обусловлено введением в систему обратной связи по выходу $y(t) = Cx(t) + B_2 u(t)$ с условием, что $B_2^T C = 0$, где B_2 — ненулевое. Такое дополнение сделано для того, чтобы избежать больших значений в управляющих сигналах. В случае обратной связи по состоянию получаем условие $B_2^T I = 0$, которое не может быть обеспечено выбором ненулевой матрицы B_2 . Поэтому в данной работе составляющая $B_2 u(t)$ не учитывалась при реализации системы управления из статьи [12], но оптимизационная задача переформулирована без упразднения компоненты Z . Такая адаптация результата статьи [12] к задаче управления по состоянию позволяет получить требуемые в постановке задачи значения в матрице K . В противном случае коэффициенты обратной связи могут достигать значений порядка 10^9 .

Результаты моделирования представлены на рис. 5 и в таблице.

В таблице параметр ΔP определяет верхнюю границу для $\limsup_{t \rightarrow \infty} [x^T(t) P^{-1} x(t)]$, а T — время до входа в область ошибки 5 % и рассчитывается как

$$T = \{t : x(t) = 0,05 \sup(|x(t)|)\}.$$

Заметим, что для работы [12] значение T не указано, так как установившаяся ошибка никогда не достигает области 5 %. Время переходного процесса в этом случае составляет 1,3 с.

Заключение

Предложенный алгоритм управления на основе метода инвариантных эллипсоидов обеспечивает лучшую (относительно рассмотренных аналогов) минимизацию возможных отклонений вектора состояния в переходных процессах от положения равновесия. Задача оптимизации сформулирована в терминах минимизации собственных значений матрицы эллипсоида вместо минимизации объема эллипсоида. Кроме того, сам выбор метода инвариантных эллипсоидов позволяет получить предварительную оценку дисперсии состояния системы за все время функционирования. Данные свойства особенно важны для систем с ограничениями по состоянию.

Кроме того, предложенный алгоритм позволяет получить разреженные по строке регуляторы без существенной потери качества функ-

ционирования за счет простой модификации исходного закона управления. Разреженность по столбцам также может быть получена без существенных изменений в структуре регулятора. В этом случае функционал качества в предлагаемом алгоритме может быть переформулирован с использованием c_1 -нормы, которая накладывает разреженность столбцов и в результате минимизирует число необходимых датчиков. Такая вариация может быть интересна в некоторых практических задачах, поскольку позволяет учесть ограничения имеющейся аппаратной базы.

Результаты моделирования демонстрируют значительное улучшение качества регулирования по ряду показателей в сравнении с ближайшими аналогами и подтверждают выводы теоретической части работы.

Список литературы

1. Поляк Б. Т., Хлебников М. В., Щербаков П. С. Разреженная обратная связь в линейных системах управления // Автоматика и телемеханика. 2014. № 12. С. 13–27.
2. Grant M., Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta. URL: <http://cvxr.com/cvx>, September 2013.
3. Grant M., Boyd S. Graph implementations for nonsmooth convex programs, Recent Advances in Learning and Control (a tribute to M. Vidyasagar). Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer, 2008. P. 95–110. URL: http://stanford.edu/boyd/graph_dcp.html.
4. Boyd S. et al. Linear matrix inequalities in system and control theory // SIAM studies in applied mathematics. 1994. Vol. 15.

5. Фуртат И. Б., Гушин П. А., Перегудин А. А. Подавление возмущений с минимизацией эллипсоидов, ограничивающих фазовые траектории системы в переходном и установившемся режимах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 4. С. 195–199.
6. Барабанов А. Е., Граничин О. Н. Оптимальный регулятор линейного объекта с ограниченной помехой // Автоматика и телемеханика. 1984. № 5. С. 39–46.
7. Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). 1996. Vol. 58, N. 1. P. 267–288.
8. Donoho D. L. Compressed sensing // IEEE Transactions on information theory. 2006. Vol. 52, N. 4. P. 1289–1306.
9. Kim S. J. et al. l_1 -trend filtering // SIAM review. 2009. Vol. 51, N. 2. P. 339–360.
10. Lin F., Fardad M., Jovanovic M. Sparse feedback synthesis via the alternating direction // American Control Conference (ACC). 2012. P. 4765–4770.
11. Lin F., Fardad M., Jovanovic M. Augmented Lagrangian approach to design of structured optimal state feedback gains // IEEE Transactions on Automatic Control. 2011. Vol. 56, N. 12. P. 2923–2929.
12. Назин С. А., Поляк Б. Т., Топунов М. В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов // Автоматика и телемеханика. 2007. № 3. С. 106–125.
13. Lin F., Fardad M., Jovanovic M. A linear matrix inequality approach to peak-to-peak gain // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 1996. Vol. 6. P. 899–927.
14. Blanchini F., Szafer M. Persistent disturbance rejection via static-state feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 1995. Vol. 40, N. 6. P. 1127–1131.
15. Furtat I. B. Robust Synchronization of the Structural Uncertainty Nonlinear Network with Delay and Disturbances // IFAC-PapersOnline. 2013 (Proc. of the 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, ALCOSP 2013). P. 227–232.
16. Furtat I. B., Fradkov A. L. Robust Control of Multi-machine Power Systems with Compensation of Disturbances // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. Vol. 73. P. 584–590.

Optimization of Invariant Ellipsoid Technique for Sparse Controllers Design

S. A. Vrazhevsky^{1,2}, vrazhevskij.s@gmail.com, J. V. Chugina¹, chugina.yulya@mail.ru,
I. B. Furtat¹, cainenash@mail.ru, D. E. Kononov², d.e.kononov@mail.ru (corresponding author),

¹Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation,

²ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Kononov D. E., Student, ITMO University,
St. Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: d.e.kononov@mail.ru

Accepted on September 23, 2021

Abstract

The paper deals with the method for the design of linear controllers with sparse state feedback matrices for control the plants under conditions of unknown and bounded disturbances. The importance of the sparsity property in feedback can be explained by two factors. First, by minimizing the columnar norm of the feedback matrix in the control it becomes possible to use a minimum number of measuring devices. Secondly, by minimizing the row norm of the feedback matrix, the required number of executive (control) devices is minimized. Both properties, if they are achievable in the synthesis of the controller, reduce the cost of the system and improve the fault tolerance and quality of regulation by reducing the structural complexity. The search algorithm for sparse matrices is based on the method of invariant ellipsoids and is formulated as a solution to a system of linear matrix inequalities with additional constraints. A special set of optimization conditions is

proposed which for a disturbed system minimizes overshoot and overshoots in transient processes of the disturbed closed-loop system simultaneously with minimizing errors in the steady state. The proposed method also assumes the possibility of minimizing both the row norm of the feedback matrix and the column one, while preserving the robustness properties, which makes it possible to solve the sparse control problem (a sparse control is understood as a linear controller with a sparse feedback matrix). The efficiency of the proposed control scheme is confirmed by the results of computer modeling and comparison with some existing ones.

Keywords: optimization problem, convex optimization, invariant ellipsoid methods, sparse control

Acknowledgements: The main result was obtained at the expense of a grant from the President of the Russian Federation (project no. MD-1054.2020.8) at IPME RAS. The convex programming problem was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-08-00610) at IPME RAS. Numerical studies were carried out with a grant from the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-08-00246) at IPME RAS.

For citation:

Vrazhevsky S. A., Chugina J. V., Furtat I. B., Kononov D. E. Optimization of Invariant Ellipsoid Technique for Sparse Controllers Design, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol.23, no. 1, pp. 3—12.

DOI: 10.17587/mau.23.3-12

References

1. Polyak B. T., Khlebnikov M. V., Shcherbakov P. S. Sparse feedback in linear control systems, *Automation and Remote Control*, 2014, vol. 75, pp. 2099—2111.
2. Grant M., Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta, available at: <http://cvxr.com/cvx>, September 2013.
3. Grant M., Boyd S. Graph implementations for nonsmooth convex programs, Recent Advances in Learning and Control (a tribute to M. Vidyasagar), Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer, 2008, pp. 95—110, available at: http://stanford.edu/boyd/graph_dcp.html.
4. Boyd S., Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear matrix inequalities in system and control theory, *SIAM studies in applied mathematics*, 1994, vol. 15.
5. Furtat I. B., Gushchin P. A., Peregudin A. A. Disturbance Attenuation with Minimization of Ellipsoids Restricting Phase Trajectories in Transition and Steady State, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 195—199 (in Russian).
6. Barabanov A. E., Granichin O. N. An optimal controller of a linear plant subjected to constrained noise, *Automation and Remote Control*, 1984, vol. 45, no. 5, pp. 578—584.
7. Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1996, vol. 58, no. 1, pp. 267—288.
8. Donoho D. L. Compressed sensing, *IEEE Transactions on information theory*, 2006, vol. 52, no. 4, pp. 1289—1306.
9. Kim S. J. et al. l_1 -trend filtering, *SIAM review*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 339—360.
10. Lin F., Fardad M., Jovanovic M. Sparse feedback synthesis via the alternating direction, *American Control Conference (ACC)*, 2012, pp. 4765—4770.
11. Lin F., Fardad M., Jovanovic M. Augmented Lagrangian approach to design of structured optimal state feedback gains, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, vol. 56, no. 12, pp. 2923—2929.
12. Nazin S. A., Polyak B. T., Topunov M. V. Rejection of bounded exogenous disturbances by the method of invariant ellipsoids, *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, pp. 467—486.
13. Lin F., Fardad M., Jovanovic M. A linear matrix inequality approach to peak-to-peak gain, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1996, vol. 6, pp. 899—927.
14. Blanchini F., Sznajder M. Persistent disturbance rejection via static-state feedback, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, vol. 40, no. 6, pp. 1127—1131.
15. Furtat I. B. Robust Synchronization of the Structural Uncertainty Nonlinear Network with Delay and Disturbances, *IFAC-PapersOnline*, 2013 (Proc. of the 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, ALCOSP 2013), pp. 227—232.
16. Furtat I. B., Fradkov A. L. Robust Control of Multi-machine Power Systems with Compensation of Disturbances, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, vol. 73, pp. 584—590.

15—18 марта 2022 г.



XXIII конференция молодых ученых "НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ" Санкт-Петербург, Россия



В формат конференции включаются обзорные лекции ведущих ученых в области теории и практики построения современных систем навигации и управления движением и доклады участников конференции.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprb.ru

Д. М. Шпрехер¹, д-р техн. наук, проф., shpreher-d@yandex.ru,

Г. И. Бабочкин², д-р техн. наук, проф., babokinginov@yandex.ru,

А. В. Зеленков¹, аспирант, sashazelinkv@mail.ru,

¹Тульский государственный университет, г. Тула,

²Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Горный институт, г. Москва,

Нейросетевой алгоритм настройки ПИ регулятора в системе управления очистного комбайна

Рассматривается система управления очистным комбайном, который предназначен для разрушения горной породы и погрузки ее на забойный конвейер. При обработке комбайном пласта угля внешние возмущения — сопротивляемость угля резанию, твердые включения породы, изменение ширины захвата шнеков, изменяющиеся неопределенно, приводят к ухудшению качества переходных процессов. В работе акцентируется внимание на системе управления комбайном, ключевыми элементами в которой являются: привод подачи, привод резания, угольный забой и типовый регулятор, обеспечивающий системе желаемые показатели качества управления.

Типовой регулятор тока резания в виде ПИ регулятора с параметрами, настроенными на конкретный режим работы комбайна, не может обеспечить оптимальное функционирование системы управления во всех режимах в силу нелинейности объекта управления и случайного характера изменения сопротивляемости угля резанию. Для улучшения показателей качества управления необходимо выбирать параметры ПИ регулятора так, чтобы минимизировать амплитуды бросков тока двигателя резания, а значит, и снизить амплитуды момента в трансмиссии привода резания и минимизировать время успокоения системы.

В настоящей работе предлагается алгоритм настройки, в основе которого лежит идентификация вида возмущающего воздействия по кривым отклика системы, доступным наблюдению, в целях получения значений параметров регулятора для каждого из возможных режимов функционирования комбайна.

При этом предложено применять искусственную нейронную сеть прямого распространения сигнала, выступающую в качестве оперативного средства распознавания многомерной кривой отклика в контуре управления. Была использована нейронная сеть двух архитектур: со скалярной и векторной выходными функциями. Алгоритм распознавания кривых удовлетворяет ограничениям по быстродействию решения задачи управления электромеханической системой, так как распознавание возмущения происходит за время, не превосходящее время выхода процесса на максимум броска тока. Корректность полученных результатов была подтверждена результатами компьютерного моделирования.

Ключевые слова: очистной комбайн, перегрузка, ПИ регулятор, переходный процесс, нейронная сеть, система управления, достоверность распознавания, позиционный код

Введение

Подземный способ добычи угля в настоящее время ориентирован на использование очистных механизированных комплексов, в которых очистной комбайн (ОК) выполняет основную функцию — разрушение горной породы и ее погрузку на забойный конвейер [1].

Технологический процесс угледобычи является нелинейным и нестационарным в виду изменения значений параметров механизмов, входящих в состав очистных механизированных комплексов, в которых такие процессы протекают. Нестабильность параметров объекта управления без перенастройки регулятора приводит к ухудшению качества переход-

ных процессов, что выражается, в том числе, в увеличении энергопотребления, ухудшении сортности добываемого угля и поломке резцов исполнительного органа (ИО). Но на практике такая перенастройка на шахте обычно не проводится из-за ее трудоемкости и высоких требований к квалификации исполнителей [2].

Кроме того, возмущения различной природы оказывают существенное влияние на ход технологического процесса угледобычи, усложняя задачу управления. К ним следует отнести неконтролируемые внешние возмущающие воздействия, основным из которых является сопротивляемость угля резанию, обусловленная содержанием крупных консолидированных включений (линз, окатышей, валунов).

Так, при встрече ИО комбайна с твердыми включениями породы в пласте угля в случае, если сигнал управления на снижение скорости подачи ОК не поступит своевременно, могут возникнуть большие ударные нагрузки на ИО и в трансмиссиях приводов резания и подачи. Как следствие, происходит повышенный износ режущего инструмента или поломка комбайна, а значит, потеря добычи за счет возрастания длительности простоев ОК.

В данных условиях актуальной потребностью является разработка и применение регуляторов, управляющее воздействие которых формируется так, чтобы оперативно реагировать на изменения возмущающих и задающих воздействий, обеспечивая точность и качество управления процессом угледобычи в заданном диапазоне значений.

Система управления очистным комбайном с типовым регулятором

Объектом управления для разрабатываемого регулятора является ОК, включающий приводы подачи и резания (рис. 1) [3].

Привод подачи предназначен для передвижения комбайна в процессе работы с необходимым тяговым (напорным) усилием, а также при различных маневровых операциях и состоит из асинхронного двигателя подачи (АДп), редуктора подачи и вынесенных или встроенных механизмов перемещения. Привод резания содержит электродвигатель резания (АДр), редуктор резания и ИО шнекового или барабанного типа, который, вращаясь со скоростью $n_{\text{ИО}}$ и перемещаясь поступательно,

врезается в угольный массив и осуществляет разрушение угольного пласта (рис. 1).

В системе управления ОК применяют типовой регулятор тока резания (нагрузки) (РТР) в виде ПИ регулятора, назначение которого — не допустить перегрузки или опрокидывания электродвигателя привода резания путем контроля параметра рабочего тока электродвигателя резания I_p с помощью сигнала с датчика тока, путем изменения скорости подачи V_p комбайна при изменении сопротивляемости полезного ископаемого резанию A и условий работы комбайна [4]. Регулирование скорости V_p и усилия подачи комбайна $F_{\text{сп}}$ осуществляется с помощью преобразователя частоты (ПЧ) за счет изменения частоты $f_{\text{ст}}$ и напряжения $U_{\text{ст}}$ на статоре АДп.

Данная система управления вынуждена работать в условиях параметрических возмущений $M_{\text{ср}}$, действующих на ИО в процессе разрушения угольного пласта, которые формируются под влиянием разнообразных, сложным образом взаимодействующих и непрерывно изменяющихся во времени и в пространстве факторов. Сложность в управлении добавляет случайный характер самого процесса разрушения угля, приводящий к появлению непрогнозируемых ударных нагрузок на ИО [5].

Таким образом, процесс разрушения и погружки угля носит случайный нестационарный характер, следовательно, при синтезе систем управления процессом угледобычи целесообразно использовать методы оперативной корректировки коэффициента передачи регулятора тока (РТР) асинхронного двигателя резания (АДр) и постоянной времени интегрирования этого регулятора.

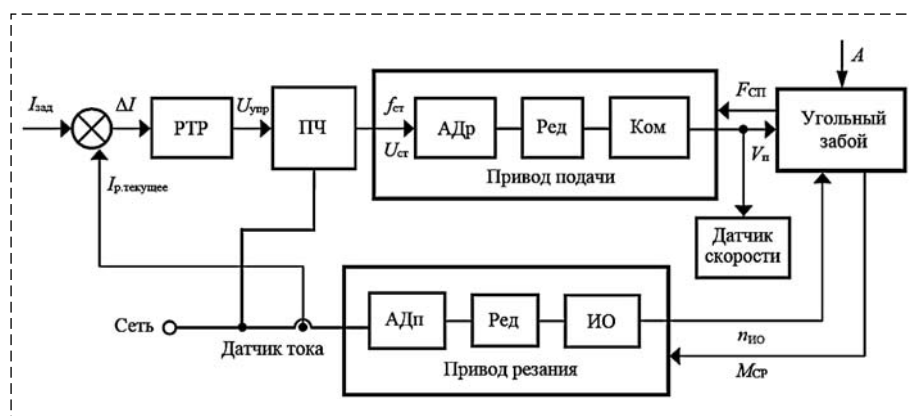


Рис. 1. Структурная схема совместной работы привода подачи и привода резания в очистном комбайне

Fig. 1. Block diagram of the joint operation of the motion drive and cutting drive of the shearer

За последние десятилетия было разработано множество различных подходов к настройке типовых регуляторов, включая ПИ регуляторы, например, правила Циглера—Николса, Коэна—Куна, Чина—Хронеса—Ресквика [6]. Однако точность данных методов во многом зависит от точности полученной модели объекта управления, что является достаточно нетривиальной задачей в условиях горного производства. Кроме того, П и ПИ законы регу-

лирования являются линейными, в то время как в реальности, строго говоря, не существует линейных стационарных объектов управления (ОУ) [7]. Коэффициенты таких регуляторов часто подобраны оптимально для конкретного состояния объекта, однако при его переходе в другие состояния данные значения коэффициентов уже не позволяют получать требуемые по качеству переходные процессы. Это ведет к снижению качества регулирования [8, 9]. Данная проблема актуальна для многих отраслей — от микротехнологий до крупной промышленности.

Перспективным направлением совершенствования современных систем управления сложными электромеханическими объектами является широкое использование методов и технологий искусственного интеллекта, обеспечивающих высокую эффективность процессов управления и широкий диапазон функциональных возможностей в условиях неопределенности модели объекта [10]. Так, в работе [11] рассматриваются вопросы синтеза законов управления манипуляционными микроробототехническими системами с блоками предсказания. В статье [12] была предложена математическая модель продольного движения грузового автомобиля и нейросетевая реализация алгоритма функционирования адаптивного круиз-контроля. В работе [13] разработан нейросетевой блок автонастройки ПИД регулятора для объектов энергетики.

Более фундаментальные и прикладные вопросы аппаратно-программной реализации алгоритмов отражены в работах [14—16].

Рассмотренные в работах методы аппроксимации законов изменения коэффициентов ПИ регулятора могут быть в дальнейшем использованы для построения систем управления, способных эффективно функционировать в различных режимах. Полученные результаты позволяют констатировать тот факт, что в процессе изменения параметров объекта существенное превосходство дает использование нейросетевого блока автонастройки. Обоснованность подхода подтверждена численным моделированием, а также результатами управления реальными объектами.

Актуальность данной проблемы в угледобывающей промышленности обусловлена частыми поломками оборудования в результате длительных колебательных процессов в механических частях трансмиссии динамических

моментов со значениями, большими номинальных. Однако готовых для внедрения решений по синтезу нейросетевых систем управления для электроприводов очистных комбайнов обнаружено не было.

Алгоритм настройки типового ПИ регулятора

Для того чтобы качество управления не ухудшалось, необходимо получить значения параметров регулятора для каждого из возможных режимов функционирования ОУ, включая и компенсацию возмущений.

Для расчета оптимальных параметров ПИ регулятора необходимо знать характер изменения сопротивления угля резанию, который, в свою очередь, можно идентифицировать по форме начального фрагмента кривой отклика на скачок нагрузки [17].

Реализовать настройку коэффициентов ПИ регулятора возможно с использованием искусственной нейронной сети (НС) прямого распространения сигнала, выступающей в качестве оперативного средства распознавания многомерной кривой отклика в контуре управления.

При внезапном изменении сопротивления угля резанию, в частности, при различных уровнях скачков и их комбинаций, быстродействие регулятора тока резания (длительность переходных процессов) и броски тока также различаются, успокоение переходного процесса также происходит за разное время и зависит от параметров регулятора.

Для улучшения качества переходного процесса необходимо выбирать параметры ПИ регулятора так, чтобы минимизировать амплитуды бросков тока, а значит, и снизить амплитуды момента в трансмиссии привода резания и минимизировать время успокоения системы (снизив время действия максимальных моментов в трансмиссии), в том числе, относительно ПИ регулятора в данных условиях.

Удовлетворить обоим требованиям можно, минимизировав интеграл функции, вычисляемый дискретизацией и суммированием невязки в каждом отсчете кривой тока резания и отсчетов линии уставки в заданном временном интервале, который пропорционален потоку механической энергии в трансмиссии. Таким образом, оптимальными настройками ПИ регулятора K_p и K_I считаются такие, которые при заданном возмущающем воздействии A обеспечивают минимум площади S под кривой

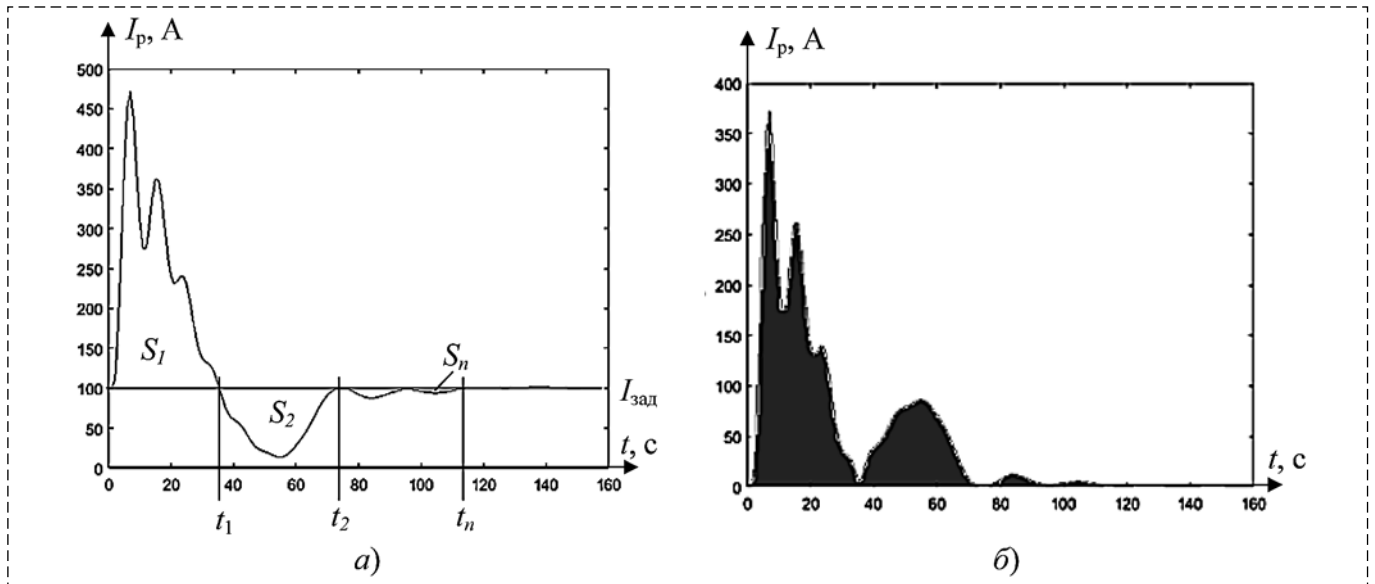


Рис.2. График изменения силы тока резания при внезапном изменении параметра сопротивляемости угля резанию (а) и переход к кривой, площадь под которой необходимо минимизировать (б)

Fig. 2. The graph of the change in the cutting current with a sharp change in the coal cutting resistance parameter (a) and the transition to the curve, the area under which it is necessary to minimize (b)

силы тока статора асинхронного двигателя (АД) резания, регистрируемой после скачка (или первого из комбинации скачков) (рис. 2):

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \int_0^{t_1} (I_p(t) - I_{\text{зад}}) dt + \left| \int_{t_1}^{t_2} (I_p(t) - I_{\text{зад}}) dt \right| + \dots + \left| \int_{t_{n-1}}^{t_n} (I_p(t) - I_{\text{зад}}) dt \right|.$$

Для решения вышеупомянутой задачи предлагается алгоритм, содержащий следующую последовательность этапов.

1. С использованием компьютерной модели системы "ПИ регулятор—Угольный комбайн", реализованной в среде MATLAB/Simulink, формирование обучающей выборки (табл. 1) [18].

В табл. 1 приняты следующие обозначения.

Входные данные:

$A_1 \dots A_N$ — одиночные значения или комбинации скачков сопротивляемости угля реза-

ния; $K_{P1} \dots K_{PN}$ — пропорциональная составляющая ПИ регулятора; $K_{I1} \dots K_{IN}$ — интегральная составляющая ПИ регулятора;

Выходные данные:

$\{I\}_1 \dots \{I\}_N$ — отсчеты кривой силы тока статора АД резания, регистрируемые после скачка (или первого из комбинации скачков); $\{V\}_1 \dots \{V\}_N$ — отсчеты кривой скорости подачи ОК, регистрируемые после скачка (или первого из комбинации скачков); $S_1 \dots S_N$ — площади под кривой силы тока статора АД резания, регистрируемые после скачка (или первого из комбинации скачков).

В выборке всех возможных комбинаций A , K_P и K_I объемом N определяются оптимальные сочетания $[A, K_P^*$ и $K_I^*]$ по критерию:

$$S \rightarrow \min.$$

2. На основе выборки (табл. 1) формируется модель распознавания отклика системы "ПИ регулятор—очистной комбайн". Входные и выходные параметры модели представлены в табл. 2.

В табл. 2 приняты следующие обозначения.

Входные данные:

$K_{P1} \dots K_{PM}$ — пропорциональная составляющая ПИ регулятора; $K_{I1} \dots K_{IM}$ — интегральная составляющая ПИ регулятора; $\{I\}_1 \dots \{I\}_N$ — первые M отсчетов кривой силы тока статора АД резания, регистрируемые после скачка (или первого из комбинации скачков); $\{V\}_1 \dots \{V\}_M$ —

Таблица 1
Table 1

Входные и выходные данные модели наблюдения

Observation model inputs and outputs

Входные данные			Выходные данные		
A_1	K_{P1}	K_{I1}	$\{I\}_1$	$\{V\}_1$	S_1
...	...	...	...	...	...
A_N	K_{PN}	K_{IN}	$\{I\}_N$	$\{V\}_N$	S_N

Таблица 2
Table 2

Входные и выходные данные модели распознавания
Input and output data of the recognition model

Входные данные				Выходные данные
K_{P1}	K_{I1}	$\{I\}_1$	$\{V\}_1$	A_1
...	...	...	...	...
K_{PM}	K_{IM}	$\{I\}_M$	$\{V\}_M$	A_M

первые M отсчетов кривой скорости подачи ОК, регистрируемые после скачка (или первого из комбинации скачков)

Выходные данные:

$A_1...A_M$ — одиночные значения или комбинации скачков сопротивляемости угля резания.

Системотехнически речь идет о L моделях распознавания, где L — число сочетаний значений K_P и K_I , т. е. для каждого сочетания K_P и K_I на вход модели подаются отсчеты двумерной кривой $\{I\}, \{V\}$, на выходе снимается распознанный вид скачка A . Выборка, вид которой представлен в табл. 2, используется для обучения нейронной сети (НС) прямого распространения. При этом также могут применяться L нейросетевых моделей распознавания, каждая для своей комбинации K_P и K_I : на вход подаются отсчеты кривой $\{I\}, \{V\}$, на выходе снимается распознанный вид скачка A .

3. Регистрируется или моделируется процесс работы ОК в условиях непредсказуемых видов скачков (если скачки непредсказуемы во времени и по уровню, то получается полный марковский процесс как обобщение схемы Бернулли). ПИ регулятор имеет начальные значения коэффициентов: K_P^1 и K_I^1 . Регистрируем факт начала скачка и первые M отсчетов переходного процесса. Отсчеты идентифицируемой кривой после скачка на интервале 1,25 с силы тока статора АД резания и скорости подачи показаны на рис. 3, а, б, соответственно, параметры $A = 6$; $K_P = 0,21$; $K_I = 2,5$.

В реальных условиях окружающей среды информацион-

ные системы большинства технических объектов функционируют в условиях шумов и искажений. Поэтому на вход модели распознавания подаются искаженные (согласованной низкочастотной помехой) и зашумленные (белым гауссовским шумом) первые M отсчетов двумерного сигнала $\{I\}, \{V\}$. На выходе модели формируется оценка распознанного класса вида скачка A' . Класс A в общем случае характеризует уровни и последовательность серии ступенчатых аппроксимаций изменения сопротивляемости угля резанию. Первые M отсчетов переходного процесса регистрируются на длительности T_1 . Общая длительность переходного процесса составляет $T_1 + T_2$ (рис. 3).

Параллельно решается оптимизационная задача выбора соотношения интервалов T_1/T_2 , при котором, с одной стороны, обеспечивается устойчивое распознавание в условиях помех и шумов, с другой стороны, еще остается выигрыш оптимального управления, связанный с упреждающей коррекцией коэффициентов ПИ регулятора под распознанный класс скачка сопротивляемости угля резанию.

4. Для распознанного вида скачка A' по табл. 1 определяется оптимальная комбинация K_P^{opt} и K_I^{opt} , для которой $S \rightarrow \min$.

5. Выполняется коррекция параметров ПИ регулятора:

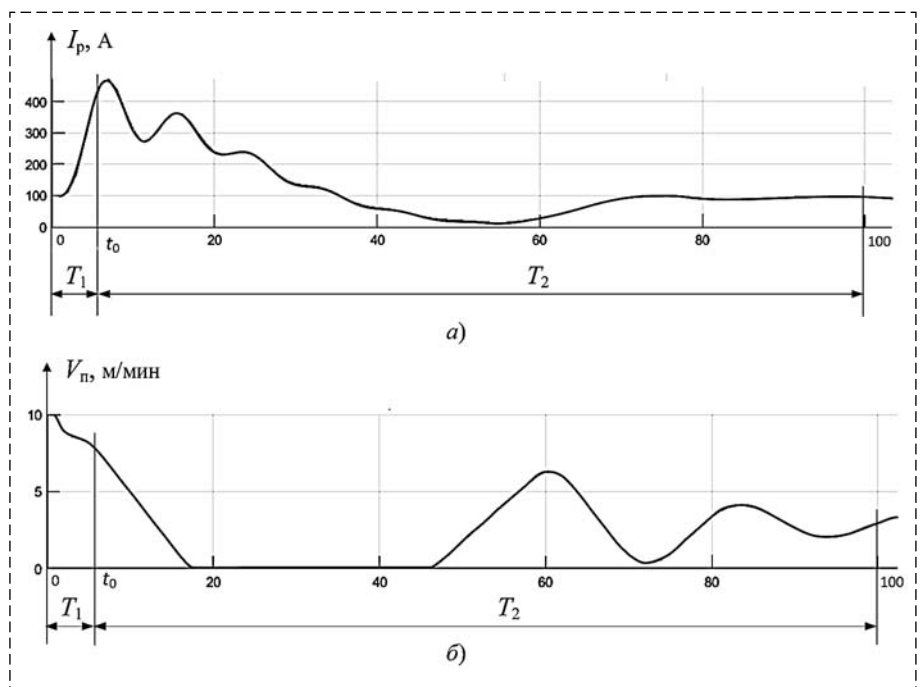


Рис. 3. Формирование фрагмента первых отсчетов:

а — силы тока статора АД резания; б — скорости подачи очистного комбайна

Fig. 3. Formation of a fragment of the first indications of:

а — stator current of the cutting electric motor; б — speed of movement of the shearer

$$\begin{cases} \Delta K_p = (K_p^1 - K_p^{opt}) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right); \\ \Delta K_I = (K_I^1 - K_I^{opt}) \left(\frac{S_1}{S_1 + S_2} \right), \end{cases}$$

где S_1 и S_2 — площади под участками кривой наблюдения и прогнозирования, соответственно, для длительностей T_1 и $(T_1 + T_2)$ (рис. 3).

При ограничениях на вычислительные ресурсы контроллера формулы для коррекции можно упростить:

$$\begin{cases} \Delta K_p = (K_p^1 - K_p^{opt}) \left(\frac{T_1}{T_1 + T_2} \right); \\ \Delta K_I = (K_I^1 - K_I^{opt}) \left(\frac{T_1}{T_1 + T_2} \right), \end{cases}$$

где T_1 и T_2 — длительность регистрации кривой на входе модели распознавания и оставшаяся длительность переходного процесса, соответственно.

6. В момент времени t_0 , точнее $(t_0 + \Delta t)$, где Δt — время, отводимое на распознавание и коррекцию, присваиваются новые значения коэффициентам ПИ регулятора:

$$\begin{cases} K_p^2 = K_p^1 + \Delta K_p; \\ K_I^2 = K_I^1 + \Delta K_I. \end{cases}$$

При этом обобщенная схема регулирования, приведенная на рис. 1, путем дополнения функциональными блоками преобразуется к виду, изображенному на рис. 4.

В общем случае в качестве источников данных для идентификации вида возмущающего воздействия на объект регулирования могут использоваться n сечений многомерной кривой отклика, доступных наблюдению (рис. 5).

Алгоритм распознавания кривых должен быть масштабируемым относительно n , а также должен удовлетворять ограничениям по быстродействию решения задачи управления электромеханической системой, так как распознать скачок необходимо, когда переходный процесс не вышел на максимум броска силы тока (см. рис. 2, 3).

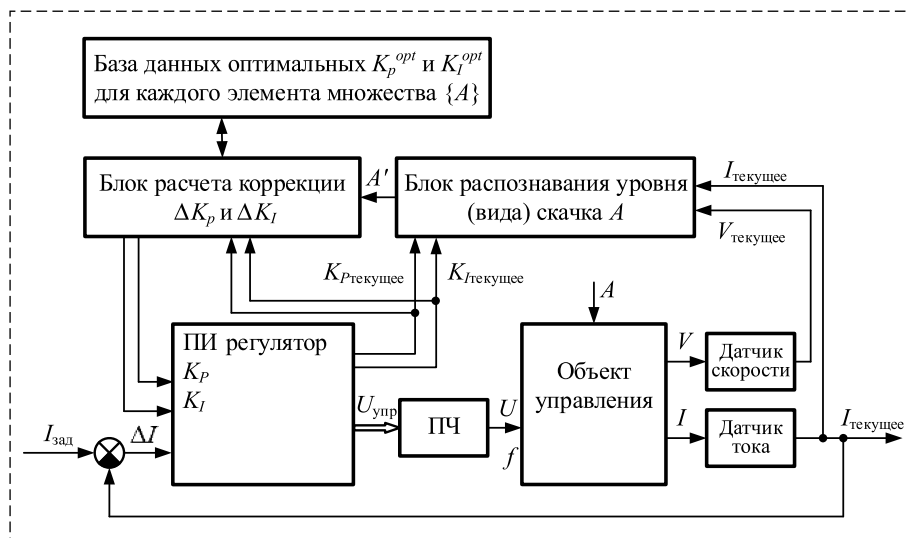


Рис. 4. Преобразованная схема регулирования угольного комбайна

Fig. 4. Converted control circuit for the shearer

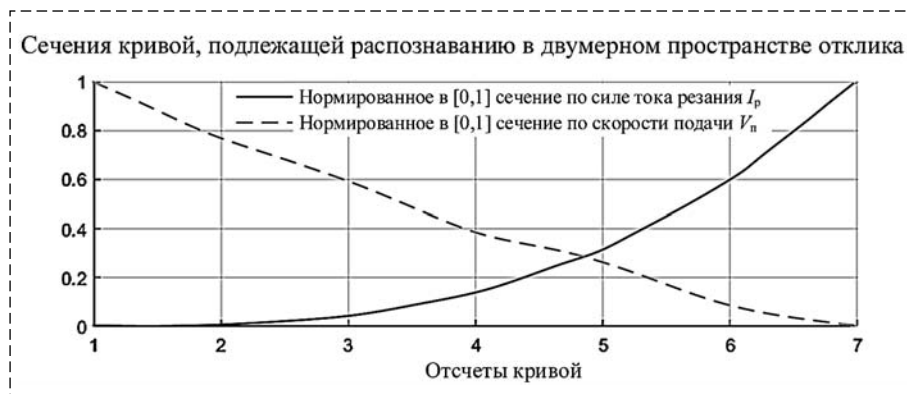


Рис. 5. Два сечения фрагмента двумерной кривой, подаваемых на вход алгоритма распознавания

Fig. 5. Two sections of a fragment of a two-dimensional curve supplied to the input of the recognition algorithm

Нейросетевая реализация алгоритма настройки ПИ регулятора

Реализовать настройку коэффициентов ПИ регулятора возможно с использованием искусственной НС прямого распространения сигнала, выступающей в качестве оперативного средства распознавания многомерной кривой отклика в контуре управления параметрами контроллера.

ОУ, или источником данных переходных процессов в модели наблюдения, является модель функционирования угле-

добывающего комбайна УКД300, реализованная в системе Simulink [18].

На вход модели наблюдения подается дискретный уровень скачка сопротивляемости угля резанию A .

Принято, что внутреннее состояние объекта наблюдения с достаточной для достоверного распознавания степенью приближения описывается двумя скалярными величинами:

- пропорциональной составляющей ПИ регулятора силы тока АД резания K_p ;
- интегральной составляющей ПИ регулятора силы тока АД резания K_I .

С выхода модели наблюдения снимаются дискретные отсчеты двумерной кривой $\{I\}, \{V\}$, где I — сила тока АД резания, V — скорость подачи ОК.

Генерация обучающей выборки заключается в последовательном выполнении следующих этапов:

1. Задание условий начального уровня скачка $A = A_1$ и начальных значений составляющих ПИ регулятора силы тока АД резания K_p^1 и K_I^1 .
2. Запуск модели функционирования ОК.
3. Регистрация и запись в двумерный массив реализаций кривой отклика $\{I\}, \{V\}_1$ на скачок A_1 .
4. Последовательная вариация условий функционирования ОК $[A_1, \dots, A_n], [K_p^1, \dots, K_p^m], [K_I^1, \dots, K_I^k]$ с запуском модели функционирования и регистрацией $M = nmk$ кривых отклика в трехмерный массив.

Задача распознавания заключается в оценке уровня скачка $A_i, i = 1, \dots, M$, по фрагменту (начальным отсчетам) двумерной кривой $\{I\}, \{V\}_i$, при заданных состояниях K_p^i и K_I^i .

Входной вектор обучающей выборки содержит первые L отсчетов распознаваемой кривой и, в силу разных диапазонов кривой по току $[1, 100]$ и скорости $[1, 10]$ s_i , нормирован в интервал $s_i^{norm} \in [0, 1]$:

$$s_i^{norm} = \frac{s_i - s_{i,\min}}{s_{i,\max} - s_{i,\min}}(b - a) + a,$$

где a и b — границы нормированного диапазона ($a = 0, b = 1$); $s_{i,\min}$ и $s_{i,\max}$ — минимальное и максимальное значения на интервале нормирования.

Выходные переменные обучающей выборки характеризуют скалярную величину — уровень скачка сопротивляемости угля резанию A , в связи с чем нормировка/денормировка выходных векторов нецелесообразна.

Таким образом, возможно применение многослойной НС прямого распространения двух архитектур. Первая, с так называемой скалярной функцией выхода, имеет архитектуру $\{L, X_1, \dots, X_N\}$, где L — размер входного слоя, $X_1, \dots, X_N$ — размеры скрытых слоев, число скрытых слоев 1. Входными сигналами будут фрагменты сечения кривой по силе тока резания $\{S_1^1, S_{L1}^1\}$ и фрагменты сечения кривой по скорости подачи ОК $\{S_1^2, S_{L2}^2\}$, выход e_j состоит из одного нейрона и соответствует виду скачка A . Вторая НС, с так называемой векторной функцией выхода, имеет архитектуру $\{2L, X_1, \dots, X_N\}$. Входные сигналы идентичны первой НС, число выходных нейронов соответствует числу возможных значений (вариантов) A . Число скрытых слоев 2.

Вычисление взвешенных выходных значений $w_{ij} \cdot f(s_i)$ нейронов с учетом максимального числа слоев осуществляется в соответствии с выражением

$$c_j = f_j^{[3]} \left(\sum_{m=1}^{n_3} w_{mj}^{[3]} \left(f_m^{[2]} \left(\sum_{h=1}^{n_2} w_{hm}^{[2]} \left(f_h^{[1]} \left(\sum_{i=1}^{n_1} w_{ih}^{[1]} s_i \right) \right) \right) \right) \right),$$

$$j = \overline{1, n_3},$$

где n_2, n_3 — число нейронов в скрытых слоях; n_1 — число нейронов распределительного слоя; s_i — i -й вход НС; w — весовые коэффициенты по слоям с индексами i, h, m ; f — функции активации по слоям с индексами h, m, j .

В экспериментах все передаточные функции нейронов одинаковые:

$$f^{[s]}(x) = \frac{e^{a^{[s]}x} - e^{-a^{[s]}x}}{e^{a^{[s]}x} + e^{-a^{[s]}x}},$$

где a — параметр крутизны гиперболического тангенса; x — взвешенная сумма входов нейрона.

Алгоритмом обучения обеих архитектур НС выбран квазиньютоновский алгоритм, или процедура второго порядка, в которой кроме первых используются производные и второго порядка [19].

На рис. 6 приведены зависимости достоверности распознавания скачка сопротивляемости угля резанию двумя типами НС (со скалярной и векторной функциями выхода) в зависимости от числа первых отсчетов фрагмента кривой, использованной при распознавании. В численных экспериментах использовались от 10 до 1000 примеров обучающей выборки, в которой нормированные значения сопротивляемости угля A изменялись от 1 до 10 с равномерным шагом от 1 до 0,01.

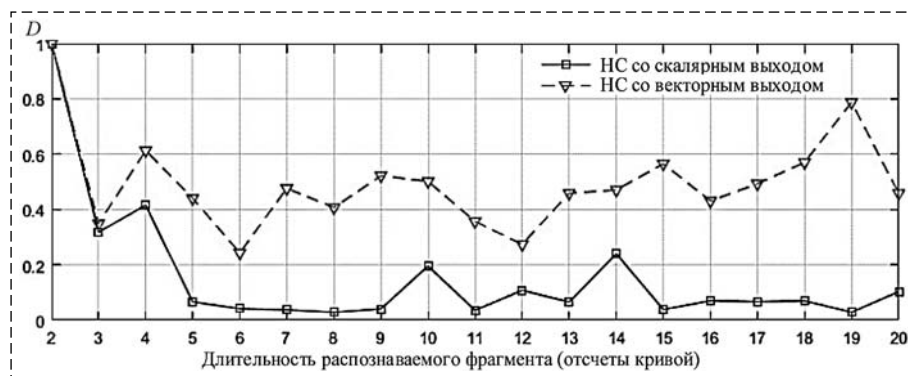


Рис. 6. Зависимость достоверности D распознавания вида скачка силы тока от длительности фрагмента наблюдения

Fig. 6. Dependence of the recognition reliability of the type of current surge on the duration of the observation fragment

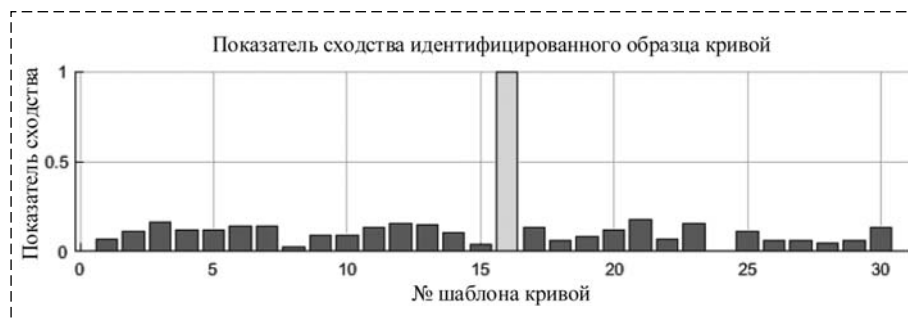


Рис. 7. Результат функционирования НС с векторной функцией выхода

Fig. 7. The result of the functioning of the neural network with a vector output function

Зависимости свидетельствуют о более высокой помехоустойчивости распознавания с использованием НС с векторной функцией выхода, платой за которую является на порядок более трудоемкое длительное обучение.

НС с векторной функцией выхода использует в выходном слое НС позиционный код вида

$$[-1, -1, \dots, 1, \dots, -1] \rightarrow C_j, \quad j = \overline{1, M}.$$

$1, 2, \dots, j, \dots, M$

Иными словами, наличие единичного уровня выходного сигнала j -го нейрона в совокупности с отрицательными уровнями остальных нейронов в целевом векторе свидетельствует об A_j -м скачке сопротивления угля, где номер нейрона с максимальным уровнем выхода указывает на номер искомого шаблона кривой и, соответственно, искомого уровня скачка A (рис. 7).

При большом объеме выборки была использована НС с двумя скрытыми слоями. Число нейронов первого и второго скрытых слоев составляло 85 и 35 соответственно.

Заключение

1. В рамках данной работы было предложено для повышения быстродействия системы регу-

лирования применить ПИ регулятор, коэффициенты которого адаптируются к внешним условиям работы ОК при внезапных изменениях нагрузки (сопротивляемости угля резанию).

2. В результате исследований способов настройки коэффициентов ПИ регулятора подтверждена возможность использования НС прямого распространения сигнала, выступающей в качестве оперативного средства распознавания многомерной кривой отклика в контуре управления параметрами контроллера ОК. Для повышения помехоустойчивости распознавания использована специализированная архитектура НС с векторной функцией выхода. Целевые обучающие векторы такой НС образованы позиционным кодом, указывающим на вид распознаваемого скачка нагрузки (изменение сопротивления угля резанию).

3. Предложенный в статье подход может быть использован при решении и других прикладных задач, в которых объект управления является нелинейным, и алгоритму управления требуется адаптироваться к меняющемуся состоянию объекта. Полученные результаты планируется использовать в дальнейшем для совершенствования системы управления нагрузкой очистных комбайнов.

Список литературы

1. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б. Математическое моделирование электропривода очистного комбайна с встроенной системой перемещения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 3. С. 645–651.
2. Morkun V., Morkun N., Tron V., Paraniuk D., Sulyma T. Adaptive control of drilling by identifying parameters of object model under nonstationarity conditions // Mining of Mineral Deposits. 2020. Vol. 14, Iss. 1. P. 100–106.
3. Воронин В. А., Непша Ф. С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 633–639.
4. Стариков Б. Я., Азарх В. Л., Рабинович З. М. Асинхронный электропривод очистных комбайнов. М.: Недра, 1981. 288 с.
5. Liu C., Qin D., Liao Y. Electromechanical dynamic analysis for the drum driving system of the long-wall shearer // Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7, N. 10. P. 1–14.

6. Pfeiffer B. M. Towards "plug and control": self-tuning temperature controller for PLC // International journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2000. N. 14. P. 519–532.
7. Глущенко А. И. Нейросетевая адаптивная настройка регуляторов для управления нестационарными технологическими объектами в металлургии: дис. докт. техн. наук. Воронеж, 2020. 304 с.
8. Еременко Ю. И., Глущенко А. И., Фомин А. В. О применении нейросетевого настройщика параметров ПИ-регулятора на тепловых объектах горно-металлургической отрасли в режиме обработки возмущений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 12. С. 122–133.
9. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID Control. Research Triangle Park: ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 461 p.
10. Емельянов А. В., Гордеев В. Н., Жабин И. П. Использование нейронных сетей для идентификации текущих параметров объекта управления электроприводом постоянного тока // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 11. Ч. 3, С. 252–261.
11. Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Использование нейросетевого предиктора в системе управления микротехнологическим процессом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8. С. 39–45.
12. Волков В. Г., Демьянов Д. Н. Синтез и нейросетевая реализация ПИ регулятора адаптивного круиз-контроля грузового автомобиля // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 11. С. 707–713.
13. Щербатов И. А., Артюшин В. А., Долгушев А. Н. Разработка нейросетевого блока автонастройки ПИД-регулятора для объектов энергетики // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2019. № 1 (6). С. 190–195.
14. Змеу К. В., Ноткин Б. С., Дьяченко П. А. Безмодельное прогнозирующее инверсное нейроуправление // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 9. С. 8–15.
15. Иващук Д. Г. Алгоритм ПИД-регулирования на основе искусственных нейронных сетей // Совершенствование методологии познания в целях развития науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. 2018. С. 16–18.
16. Кравец П. И., Жеребко В. А., Шимкович В. Н. Методика аппаратно-программной реализации одноканального нейросетевого ПИД-регулятора на FPGA // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2011. № 3 (96). С. 148–152.
17. Shprekher D. M., Kolesnikov E. B., Zelenkov A. V. Investigation of possibility to stabilize load current of shearer's cutting electric drive // Proceedings 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. Sochi, Russia. P. 248–254.
18. Шпрехер Д. М., Бабокин Г. И., Колесников Е. Б., Зеленков А. В. Исследование динамики нагружения регулируемого электропривода очистного комбайна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 514–525.
19. Shepherd A. J. Second-Order Methods for Neural Networks. London: Springer-Verlag, 1997. 145 p.

Neural Network Algorithm for Adjusting the PI Controller in the Shearer Control System

D. M. Shprekher¹, shpreher-d@yandex.ru, G. I. Babokin², babokinginov@yandex.ru,
A. V. Zelenkov¹, sashazelinkv@mail.ru

¹Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation,

²National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation

Corresponding author: D. M. Shprekher, Dr. Tech. Sc., Professor, Tula State University,
Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: shpreher-d@yandex.ru

Accepted on September 23, 2021

Abstract

The control system of a shearer is considered, which is designed for destroying rock and loading it onto a scraper conveyor. When working out a coal seam by a shearer, external disturbances — the coal resistance to cutting, solid inclusions of rock, changes in the width of the screw, which vary indefinitely, lead to a deterioration in the quality of transients. The paper focuses on the shearer control system, the key elements of which are: a movement drive, a cutting drive, a coal face and a standard regulator that provides the system with the desired control quality indicators. A typical cutting current controller in the form of a PI controller with parameters configured for a specific mode of operation of the shearer cannot ensure the optimal functioning of the control system in all modes due to the non-linearity of the control object and the random of changes in the coal resistance to cutting. To improve the control quality indicators, it is necessary to choose the parameters of the PI controller so as to minimize the amplitudes of the current steps of the cutting motor, and therefore reduce the amplitudes of the moment in the transmission of the cutting drive and minimize the system quieting time. In this paper, we propose a tuning algorithm based on obtaining the values of the controller parameters for each of the possible modes of operation of the shearer, identifying the type of disturbing effect by the response curves of the system available to observation. At the same time, the use of an artificial feed forward neural network, acting as an operational means of recognizing a multidimensional response curve in the control loop, is proposed. A neural network of two architectures was used: with a scalar and a vector output function. The curve recognition algorithm satisfies the limitations on the speed of solving the problem of controlling an electromechanical system, since the recognition of a disturbance occurs in a time that does not exceed the output of the process to the maximum of the current step. The correctness of the obtained results was confirmed by the results of computer modeling.

Keywords: shearer, overload, PI controller, transients, neural network, control system, recognition reliability, positional code

For citation:

Shprekher D. M., Babokin G. I., Zelenkov A. V. Neural Network Algorithm for Adjusting the PI Controller in the Shearer Control System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 13–22.

DOI: 10.17587/mau.23.13-22

References

1. **Babokin G. I., Shprekher D. M., Kolesnikov E. B.** Mathematical modeling of the electric drive of a shearer with a built-in moving system, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 3, pp. 645–651 (in Russian).
2. **Morkun V., Morkun N., Tron V., Paraniuk D., Sulyma T.** Adaptive control of drilling by identifying parameters of object model under nonstationarity conditions, *Mining of Mineral Deposits*, 2020, vol. 14, iss. 1, pp. 100–106.
3. **Voronin V. A., Nepsha F. S.** Simulation of the electric drive of the shearer for assessing the energy efficiency of the power supply system, *Zapiski Gornogo institute*, 2020, no. 246, pp. 633–639 (in Russian).
4. **Starikov B. Ya., Azarh V. L., Rabinovich Z. M.** Asynchronous electric drive of shearers, Moscow, Nedra, 1981, 288 p. (in Russian).
5. **Liu C., Qin D., Liao Y.** Electromechanical dynamic analysis for the drum driving system of the long-wall shearer, *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 1–14.
6. **Pfeiffer B. M.** Towards "plug and control": self-tuning temperature controller for PLC, *International journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2000, no. 14, pp. 519–532.
7. **Glushchenko A. I.** Neural network adaptive tuning of regulators to control non-stationary technological objects in metallurgy, Doctor of Technical Sciences (Engineering) dissertation, Voronezh, 2020, 304 p. (in Russian).
8. **Eremenko Yu. I., Poleshchenko D. A., Glushchenko A. I., YArmuratij D. Yu.** On intelligent adaptation of PID controller parameters to reduce energy consumption of a controlled process, *Nauchnye vedomosti. Seriya Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika*, 2013, vol. 22 (165), no. 28/1, pp. 210–217 (in Russian).
9. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID Control, Research Triangle Park: ISA, The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 461 p.
10. **Emel'yanov A. V., Gordeev V. N., Zhabin I. P.** The use of neural networks to identify the current parameters of the control object of a direct current electric drive, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 252–261 (in Russian).
11. **Il'yasov B. G., Darincev O. V., Migranov A. B.** Using a neural network predictor in a microtechnological process control system, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 8, pp. 39–45 (in Russian).
12. **Volkov V. G., Dem'yanov D. N.** Synthesis and neural network implementation of the PI controller for the adaptive cruise control of a truck, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, no. 11, pp. 707–713 (in Russian).
13. **Shcherbatov I. A., Artyushin V. A., Dolgushev A. N.** Development of a neural network block for autotuning a PID controller for power facilities, *Informacionnye tekhnologii. Problemy i resheniya.*, 2019, no. 1(6), pp. 190–195 (in Russian).
14. **Zmeu K. V., Notkin B. S., D'yachenko P. A.** Modelless predictive inverse neurocontrol, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2006, no. 9, pp. 8–15 (in Russian).
15. **Ivashchuk D. G.** PID control algorithm based on artificial neural networks, *Sovershenstvovanie metodologii poznaniya v celyah razvitiya nauki: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 2018, pp. 16–18 (in Russian).
16. **Kravec P. I., Zhrebko V. A., Shimkovich V. N.** Method of hardware and software implementation of the PID controller of a single neural network on an FPGA, *Vestnik Vinnickogo politekhnicheskogo instituta*, 2011, no. 3 (96), pp. 148–152 (in Ukr).
17. **Shprekher D. M., Kolesnikov E. B., Zelenkov A. V.** Investigation of possibility to stabilize load current of shearer's cutting electric drive, *Proceedings — 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020, Sochi, Russia*, pp. 248–254.
18. **Shprekher D. M., Babokin G. I., Kolesnikov E. B., Zelenkov A. V.** Investigation of the dynamics of loading of the variable electric drive of the shearer, *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 2, pp. 514–525 (in Russian).
19. **Shepherd A. J.** Second-Order Methods for Neural Networks, London, Springer-Verlag, 1997, 145 p.

cnews
CONFERENCES

5 апреля 2022 г., Москва

Конференция

ИТ в промышленности: от автоматизации к цифровизации

Основные проблемы

- Интернет вещей как основа «Индустрии 4.0»
- Видеоаналитика и машинное зрение: кейсы
- Большие данные и машинное обучение
- Использование роботов
- Искусственный интеллект
- Применения технологий дополненной реальности

Контактная информация

+7 (495) 500-00-36, доб. 9401, 9402, 9403, 9404
events@cnews.ru

В. Ф. Филаретов¹, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaretov@inbox.ru,

А. С. Губанков^{1, 2}, канд. техн. наук, доц., gubankov@iacp.dvo.ru,

И. В. Горностаев^{1, 2}, мл. науч. сотр., gornostaev_iv@mail.ru,

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I*

Статья посвящена вопросам сохранения динамической точности управления рабочими инструментами много-степенных манипуляторов (ММ) при их перемещениях по произвольным пространственным траекториям с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности и особых случаев расположения их звеньев. Сохранение точности управления предлагается обеспечивать за счет исключения выхода всех степеней подвижности манипуляторов на ограничения и в указанные особые положения, характеризующие неоднозначностью в решении обратных задач кинематики ММ, а также исключения выхода их рабочих инструментов на границы рабочей области за счет использования избыточной степени подвижности при подходе к указанным нежелательным положениям.

В первой части статьи рассмотрены особенности нового решения обратной задачи кинематики и описаны особые положения для шестистепенных манипуляторов с кинематическими схемами типа PUMA. Представленное решение обратной задачи кинематики учитывает различные комбинации обобщенных координат ММ, обеспечивающие перемещения их рабочих инструментов в заданные положения с требуемой пространственной ориентацией. Это решение имеет малую вычислительную сложность по сравнению с другими известными методами, что позволяет использовать для управления ММ маломощные микропроцессорные вычислители.

Результаты выполненного математического моделирования подтвердили высокую эффективность использования предлагаемого подхода к контурному управлению ММ.

Ключевые слова: многостепенный манипулятор, избыточная степень подвижности, ограничения, особые положения, обратная задача кинематики, динамическая точность управления

Введение

В настоящее время применение многостепенных манипуляторов (ММ) для выполнения различных технологических операций (ТО) в автоматическом режиме часто существенно осложняется тем, что даже при перемещении их рабочих инструментов (РИ) внутри рабочей области отдельные степени подвижности могут выходить на конструктивные ограничения. Если это происходит, то контроллер немедленно останавливает ММ с соответствующим сообщением об ошибке. Кроме того, этот же ММ может войти в одно из особых (вырожденных) положений, характеризующих неоднозначностью в решении обратной задачи кинематики

(ОЗК). В результате при продолжении движения РИ по пространственным траекториям в соответствующих степенях подвижности ММ могут возникать неожиданные реверсы, приводящие к уменьшению скорости движения РИ, столкновениям с объектами работ, к поломке инструментов и иным аварийным ситуациям. Кроме того, при работе с протяженными объектами часть траектории, по которой должен пройти РИ, может находиться вне рабочей области ММ, что потребует дополнительной переустановки этих объектов.

Если траектории движения РИ ММ формируются не во время его перемещения, то для традиционного исключения описанных негативных ситуаций требуется предварительно проводить многочисленные и трудоемкие тестовые испытания и вручную вносить коррективы в заранее спланированные траектории,

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках грантов № 19-08-00347 и 20-08-00701.

в том числе и тогда, когда в обрабатываемых деталях во время их закрепления возникают непредвиденные деформации [1, 2].

Для расширения рабочей области ММ можно обеспечивать его дополнительной линейной степенью подвижности в горизонтальной плоскости [3], получив новое решение ОЗК для конкретного многосвязника [4]. Подобная задача была решена для манипулятора, установленного на подводном аппарате [5, 6], но только для его работы в передней полусфере аппарата, что накладывало дополнительные ограничения на соответствующие степени подвижности манипулятора. В результате, используя известное решение ОЗК [7] и формируя линейное смещение аппарата вблизи объекта работ, удавалось быстро вычислять обобщенные координаты многосвязного манипулятора в заданных диапазонах и значительно расширять его рабочую область.

Однако для ММ требования к диапазонам изменения его обобщенных координат (включая избыточную) значительно расширяются и не ограничиваются только одной полусферой. Кроме того, для ММ возможны различные варианты поворота его степеней подвижности (конфигурации [8]), при которых РИ находится в одном и том же положении с одной и той же ориентацией. Все это требует нового решения ОЗК.

Другие известные методы решения ОЗК для ММ с избыточной степенью подвижности [9–14] также обладают рядом существенных недостатков. В частности, в работе [9] использован аналитический подход для решения ОЗК для семистепенного манипулятора, который позволяет исключать вход всех степеней подвижности в ограничения, но не исключает появления неожиданных реверсов в отдельных степенях подвижности. В работах [10–12] представлены методы итерационного численного решения ОЗК для кинематически избыточных манипуляторов, а также рассмотрена их реализация для семистепенных ММ. Применение этих методов позволяет однозначно определять текущие конфигурации ММ, одновременно исключая их вход в особые положения, а также вход РИ на границу рабочей области. Рассмотрен и метод введения дополнительных индикаторных функций, исключающий вход всех обобщенных координат и скоростей ММ в ограничения. Но общим недостатком этих методов является необходимость трудоемкого периодического расчета псевдообратных матриц Якоби. В работе [13] представлен метод однозначного решения ОЗК на примере шестистепенных

ММ с возможностью его расширения и для кинематически избыточных ММ с помощью нейронных сетей, а в работе [14] — модификация этого метода, в которой дополнительно используются генетические алгоритмы для улучшения точности получаемых решений. Общим недостатком этих методов является необходимость одновременной параллельной работы трех нейронных сетей с последующим выбором наилучшего получаемого с их помощью результата. Реализация этих методов требует использования мощных вычислительных средств.

Таким образом, проведенный обзор известных источников показал, что эффективных решений ОЗК для кинематически избыточных типовых ММ с учетом ограничений их степеней подвижности и исключения возможных реверсов еще не получено.

1. Постановка задачи

Целью данной работы является создание нового метода автоматического перемещения РИ ММ по произвольным пространственным траекториям без снижения динамической точности управления за счет исключения выхода их степеней подвижности на ограничения и в особые положения, а РИ — на границы рабочей области за счет использования избыточной степени подвижности ММ при подходе к указанным нежелательным положениям. Эта задача решается для ММ с кинематической схемой типа PUMA, когда траектории движения их РИ заранее неизвестны. Этот же подход может быть использован и для манипуляторов с другими кинематическими схемами.

2. Особенности решения обратной задачи кинематики для манипуляторов типа PUMA

Перед решением поставленной общей задачи вначале решается ОЗК для ММ в связанной с его основанием системе координат (СК) и рассматривается метод формирования программного сигнала управления для избыточной степени подвижности, перемещающей его основание в абсолютной СК.

На рис. 1 показана кинематическая схема ММ типа PUMA, установленного на подвижном горизонтальном основании. На рис. 1 введены следующие обозначения: O_{xyz} — абсолютная СК; $O'x'y'z'$ — связанная с подвижным

($q_{3,1}$ или $q_{3,2}$). Это неоднозначное решение ОЗК должно быть учтено при формировании соответствующих координат ММ.

Из рис. 2, а видно, что $q_{1,1} = -\arctg(R'_x/R'_y)$, где $R'_x = r'_x - a'_x L_4$, $R'_y = r'_y - a'_y L_4$ [7]. Но это выражение дает однозначное решение для формирования координаты q_1 только в диапазоне $(-\pi/2; \pi/2)$. Для диапазона $[-\pi; \pi]$ указанное выражение удобно переписать через функцию $\text{atan2}(R'_x, R'_y)$ [8], которая обеспечивает вычисление значения $\arctg(R'_x/R'_y)$ с учетом принадлежности аргумента соответствующему квадранту.

Если учесть два возможных значения q_1 ($q_{1,1}$ или $q_{1,2}$), отличающихся на угол π (рис. 2, а и 2, б), при которых за счет изменения q_2, q_3 точка R' будет иметь одно и то же положение в СК $O'x'y'z'$, то окончательно без введения дополнительных логических условий можно записать

$$q_1 = -\text{atan2}(R'_x, R'_y) + \pi k_1, \quad (2)$$

где k_1 — параметр, определяющий выбор одной из двух возможных конфигураций ММ (k_1 равен 0 или 1, если $\text{atan2}(R'_x, R'_y) \geq 0$, иначе -1). Выбор значения этого и других параметров, определяющих конфигурацию ММ, проводится автоматически и будет рассмотрен ниже.

С помощью выражения (2) можно рассчитать углы $q_{1,1}$ (для $k_1 = 0$) и $q_{1,2}$ (для $k_1 = \pm 1$), причем разворот на угол π должен осуществляться в ту сторону, для которой q_1 не выходит из диапазона $[-\pi; \pi]$. Поэтому знак $q_{1,2}$ должен быть противоположен знаку рассчитанного выше $q_{1,1}$.

При определении обобщенных координат q_2 и q_3 рассматриваются все возможные конфигурации ММ, учитывающие различное расположение характерной точки W' (см. рис. 1) оси третьего шарнира ММ (см. различное расположение точек W'_1 и W'_2 на рис. 2, а и 2, б, которым соответствуют различные пары углов $q_{2,1}, q_{3,1}$ и $q_{2,2}, q_{3,2}$).

Значение q_3 можно определить через $\arctg(s_3/c_3)$, где $s_i = \sin q_i$, $c_i = \cos q_i$, но лучше для этого также использовать функцию $\text{atan2}(\cdot)$ и записать [16]

$$q_3 = \text{atan2}(s_3, c_3). \quad (3)$$

Для определения s_3 можно использовать любой из равных треугольников (все их стороны равны) $P'W'_1R'$ или $P'W'_2R'$ (для $q_1 = q_{1,1}$ на рис. 2, а), где $P'(0; 0; L_1)$ — координаты характерной точки оси второго шарнира в СК $O'x'y'z'$.

Используя теорему косинусов для этих треугольников: $d^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \delta$ ($\cos \delta = \cos(\pi - q_{3,1}) = \cos(\pi + q_{3,2}) = -c_3$, δ — угол между вторым и третьим звеньями ММ, смежный противоположным по знаку углам $q_{3,1}$ и $q_{3,2}$ ($q_{3,1} = -q_{3,2}$) при его различных (рис. 2, а) конфигурациях), а также тот факт, что длина стороны $P'R'$ $d = \sqrt{R'^2_x + R'^2_y + (R'_z - L_1)^2}$, а $R'_z = r'_z - a'_z L_4$ [7], можно записать

$$c_3 = (d^2 - L_2^2 - L_3^2)/(2L_2L_3). \quad (4)$$

Выражение для определения s_3 имеет вид:

$$s_3 = k_2 \sqrt{1 - c_3^2}, \quad (5)$$

где $k_2 = \pm 1$ — параметр, определяющий выбор знака s_3 для соответствующей ему одной (из двух) конфигураций ММ (рис. 2, а). Подставив выражения (4) и (5) в (3), можно однозначно определить возможные значения $q_{3,1}$ (для $k_2 = -1$) и $q_{3,2}$ (для $k_2 = 1$).

Несложно показать, что если $q_1 = q_{1,2}$ (рис. 2, б), то выражения (3)—(5) полностью сохраняются и при таком повороте ММ вокруг вертикальной оси.

Возможные значения угла q_2 ММ (см. $q_{2,1}$ и $q_{2,2}$ на рис. 2, а и 2, б) можно определить по выражению [16]

$$q_2 = \alpha - \beta, \quad (6)$$

где α — угол между горизонтальной плоскостью, проходящей через точку P' , и прямой $P'R'$, равный α_1 для $k_1 = 0$ или α_2 для $k_1 = \pm 1$; β — угол между вторым звеном ММ и прямой $P'R'$ (его знак совпадает со знаком q_3); $P'_1(R'_x; R'_y; L_1)$ — координаты проекции точки R' на горизонтальную плоскость, проходящую через точку P' , в СК $O'x'y'z'$.

Аналитические выражения для определения углов α и β в равенстве (6) могут быть получены с помощью построений, представленных на рис. 2, а и 2, б.

Из треугольника $P'P'_1R'$ видно, что при $q_1 = q_{1,1}$ (рис. 2, а)

$$\text{tg} \alpha_1 = P'R'/P'P'_1 = (R'_z - L_1)/\sqrt{R'^2_x + R'^2_y}.$$

Выразив из этого равенства α_1 и используя функцию $\text{atan2}(\cdot)$, для обеих представленных на рис. 2, а конфигураций ММ можно записать

$$\alpha_1 = \text{atan2}(R'_z - L_1, \sqrt{R'^2_x + R'^2_y}), \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_1. \quad (8)$$
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= P'_{2,1} R' / (P' W'_1 + W'_1 P'_{2,1}) = \\ &= (L_3 \sin q_{3,1}) / (L_2 + L_3 \cos q_{3,1}). \end{aligned}$$
$$\beta = \text{atan2}(L_3 s_3, L_2 + L_3 c_3). \quad (9)$$

Для расчета остальных обобщенных координат q_4, q_5, q_6 рассматриваемого ММ с учетом расширенных диапазонов их изменений в качестве исходных были использованы выражения, ранее полученные в работе [7]:

$$q_4 = \arccos((-a'_x c_1 - a'_v s_1)/s_5); \quad (10)$$

$$q_5 = \arccos(-a'_x s_1 c_{23} + a'_y c_1 c_{23} + a'_z s_{23}); \quad (11)$$

$$q_6 = \arccos(b'_x(s_1s_{23}c_4 + c_1s_4) + b'_y(-c_1s_{23}c_4 + s_1s_4) + b'_z(c_{23}c_4)), \quad (12)$$

Выражения (10)–(12) справедливы при однозначном решении ОЗК для рассматриваемого ММ, только когда изменения q_4 , q_5 , q_6 происходят в диапазонах $[0; \pi]$. Поэтому следует модифицировать эти выражения так, чтобы они учитывали диапазоны $[-\pi; \pi]$.

При определении координаты q_5 (11), зависящей только от q_1, q_2, q_3 , следует учитывать две различные конфигурации ММ, при которых q_5 принимает значения с противоположными знаками, а требуемая ориентация вектора $\mathbf{a}'$ (см. рис. 1) обеспечивается за счет различных поворотов q_4 . С учетом этого выражение (11) следует переписать в виде

$$q_5 = k_3 \arccos(-a'_x s_1 c_{23} + a'_v c_1 c_{23} + a'_z s_{23}), \quad (13)$$

Поскольку с учетом выражения (10) можно определить только модуль координаты q_4 , то для определения ее знака следует получить логические условия, учитывающие постоянное совпадение векторов $\mathbf{e}_6$ и $\mathbf{a}'$. Для получения этих условий необходимо учитывать, что при изменении q_4 в противоположных направлениях вращения и при фиксированных значе-

ниях q_1, q_2, q_3 (2)–(9) и q_5 (13) наблюдается различный закон изменения (уменьшение или увеличение) проекции вектора $\mathbf{e}_6$ на ось $O'Z'$.

На рис. 3, *а* и 3, *б* показаны два варианта расположения звеньев ММ, анализ которых позволяет определить знак q_4 . Для упрощения пояснений на этих рисунках принято, что $q_1 = 0$. Поэтому первые три звена ММ располагаются в плоскости $O'y'z'$, а углы q_2 и q_3 различны, но такие, при которых оба рисунка симметричны относительно плоскости $O'x'z'$. На указанных

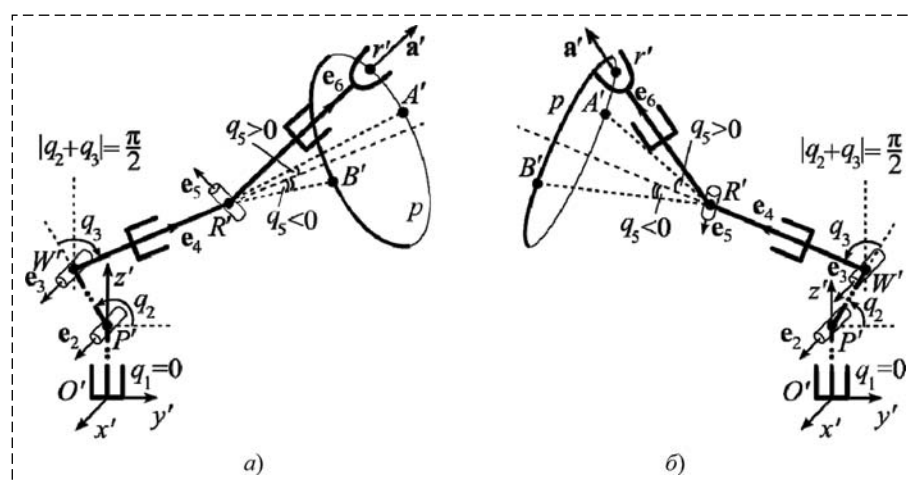


Рис. 3. Определение знака q_4 при:
 $a - |q_2 + q_3| < \pi/2$; б - $|q_2 + q_3| > \pi/2$
Fig. 3. Definition of q_4 sign at:
 $a - |q_2 + q_3| < \pi/2$; б - $|q_2 + q_3| > \pi/2$

рисунках векторы $\mathbf{e}_4$ и $\mathbf{e}_6$ не совпадают, поскольку углы $q_5 \neq 0$. Поэтому при изменении q_4 и $q_5 = \text{const}$ точка r' перемещается по окружности p .

Если вектор $\mathbf{e}_5$ лежит в плоскости $O'y'z'$, то принимается, что $q_4 = 0$, и тогда вектор $\mathbf{e}_6$ располагается в плоскости, в которой также лежит вектор $\mathbf{e}_4$ и которая перпендикулярна вектору $\mathbf{e}_5$. В этом случае в зависимости от знака $q_5 \neq 0$ векторы $\mathbf{e}_6$ на обоих рисунках займут положения $R'A'$ или $R'B'$, а их проекции на оси $O'z'$ будут равны $s_{23}c_5$ [7]. При этом положения $R'A'$ будут соответствовать $q_5 > 0$, а положения $R'B'$ — $q_5 < 0$. Расположение последнего звена ММ, показанное на рис. 3, а, может соответствовать двум различным парам значений углов q_4 и q_5 (в типовых диапазонах $[-\pi; \pi]$), например, соответственно: $\pi/4$ и $\pi/6$, $-3\pi/4$ и $-\pi/6$, а на рис. 3, б — также двум различным парам этих углов: $-\pi/4$ и $\pi/6$, $3\pi/4$ и $-\pi/6$.

На рис. 3, а и 3, б для векторов $\mathbf{a}'$ и $\mathbf{e}_6$ выполняется условие $a'_z > s_{23}c_5$. Из рис. 3, а следует, что, если $|q_2 + q_3| < \pi/2$ и $q_5 > 0$, то при перемещении РТИ из положения $R'A'$ в положение r' по окружности p $q_4 > 0$, а если $q_5 < 0$, то $q_4 < 0$. Если $|q_2 + q_3| > \pi/2$ и $q_5 > 0$ (см. рис. 3, б), то $q_4 < 0$, а если $q_5 < 0$, то $q_4 > 0$.

Несложно показать, что если $a'_z < s_{23}c_5$ (эти конфигурации ММ на рис. 3, а и 3, б не показаны), то в перечисленных ситуациях знак q_4 должен быть просто изменен на противоположный, т. е. $q_4 > 0$, если

- 1) $q_5 > 0$, $a'_z > s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| < \pi/2$;
- 2) $q_5 < 0$, $a'_z < s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| < \pi/2$;
- 3) $q_5 > 0$, $a'_z < s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| > \pi/2$;
- 4) $q_5 < 0$, $a'_z > s_{23}c_5$, $|q_2 + q_3| > \pi/2$.

В представленных условиях не учитывается случай, когда третье звено ММ может быть параллельно оси $O'z'$ ($|q_2 + q_3| = \pi/2$ и $a'_z = s_{23}c_5$). При появлении этого положения необходимо сохранять прежний знак q_4 до очередной смены знака. Поэтому для любых возможных конфигураций ММ с учетом выражения (10) в общем виде можно записать

$$q_4 = \text{sign}(k_3 k_4 k_5) \arccos((-a'_x c_1 - a'_y s_1)/s_5), \quad (14)$$

где $\text{sign} x = 1$, если $x \geq 0$, иначе -1 [8]; $k_4 = a'_z - s_{23}c_5$, $k_5 = \pi/2 - |q_2 + q_3|$.

Для выполнения условия $q_5 \neq 0$ в выражении (14) синтезируемая система управления ММ исключает полное обнуление координаты q_5 . Знак координаты q_6 (12) определяется по взаимному расположению векторов $\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_x \ \gamma_y \ \gamma_z]^T = \mathbf{e}_5 \times \mathbf{b}'$ и $\mathbf{a}'$ [7]. Если эти векторы совпадают, то угол q_6 положителен или равен нулю, иначе — отрицателен. При совпадении векторов $\boldsymbol{\gamma}$ и $\mathbf{a}'$ их скалярное произведение удовлетворяет неравенству $k_6 = \gamma_x a'_x + \gamma_y a'_y + \gamma_z a'_z \geq 0$, иначе оно отрицательно, здесь

$$\gamma_x = b'_z(s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) - b'_y(c_{23} c_4);$$

$$\gamma_y = -b'_z(c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) + b'_x(c_{23} c_4);$$

$$\gamma_z = b'_y(c_1 s_4 + s_1 s_{23} c_4) - b'_x(s_1 s_4 - c_1 s_{23} c_4) \quad [7].$$

В результате выражение (12) с учетом знака можно переписать в виде

$$q_6 = \text{sign}(k_6) \arccos(b'_x(s_1 s_{23} c_4 + c_1 s_4) + b'_y(-c_1 s_{23} c_4 + s_1 s_4) + b'_z(c_{23} c_4)). \quad (15)$$

После получения выражений для расчета всех обобщенных координат $q_1, \dots, q_6$ (см. (2)—(9) и (13)—(15)), учитывающих все возможные конфигурации ММ, требуется выбрать одну из них, для которой при переходе ММ из своего начального положения в конечное этот ММ будет максимально удален от своих особых положений (о них будет сказано ниже), а его степени подвижности — от своих ограничений.

Общая вычислительная сложность предложенного метода решения ОЗК для ММ составляет 27 операций сложения, 47 операций умножения (деления) и 21 операцию вычисления стандартных функций. Это меньше по сравнению с другими известными методами [8, 15], для которых эти значения составляют, соответственно: операций сложения — 34 и 35, умножения (деления) — 84 и 52, а также вычисления стандартных функций — 21 и 22, и при наличии современных процессоров позволяет реализовывать управление ММ в реальном времени.

Как уже отмечалось ранее, при решении ОЗК указанного ММ необходимо учитывать и его четыре особых положения (рис. 4) [17], в которых возникает неоднозначное решение ОЗК и поэтому появляются заранее непредсказуемые реверсы в некоторых степенях подвижности.

В первом особом положении (рис. 4, а) проекция точки R' на плоскость $O'x'y'$ совпадает

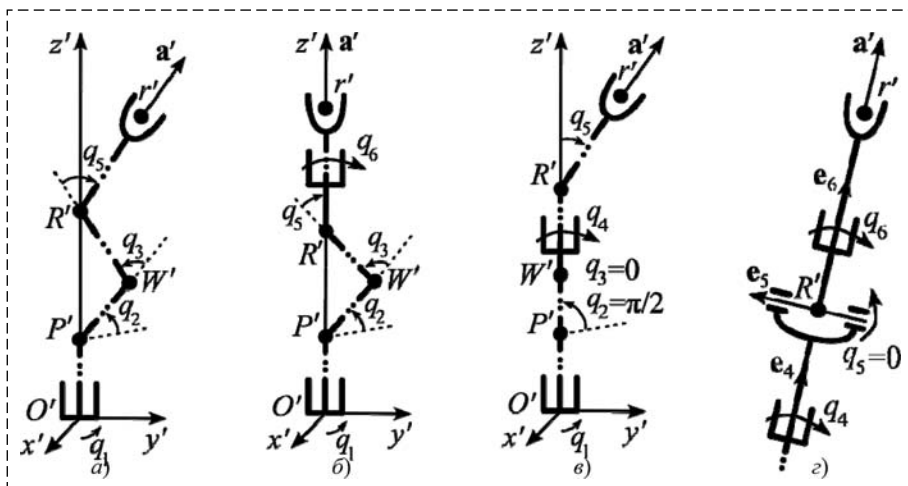


Рис. 4. Особые положения ММ
Fig. 4. Singular positions of the MM

с началом координат. В этом положении возможно множество различных значений угла q_1 , которым будут соответствовать различные q_4 , q_5 , q_6 . Во втором особом положении (рис. 4, б) начало координат, а также точки R' и r' лежат на одной вертикальной прямой, и возможно существование множества пар q_1 и q_6 . В третьем (рис. 4, в) — на одной вертикальной прямой лежат начало координат и точки W' , R' , а координаты q_1 и q_4 однозначно не определены. В четвертом особом положении (рис. 4, г) на одной прямой лежат последние звенья ММ, $q_5 = 0$, а координаты q_4 и q_6 не определены. Кроме того, при работе с крупными объектами возможен выход РИ, сохраняющих заданные пространственные ориентации, на границу рабочей области ММ, где продолжение ТО оказывается невозможным.

Но появление описанных выше особых положений и входов в ограничения ММ можно исключить при введении дополнительной (избыточной) линейной степени подвижности q_7 (см. рис. 1) [5, 6]. Особенности работы ММ с этой избыточной степенью подвижности подробно будут рассмотрены во второй части статьи.

Список литературы

1. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Разработка роботизированного комплекса для механической обработки нежестких пространственных композитных изделий вертолетов // Известия ВУЗов, Машиностроение, Специальный выпуск "Специальная робототехника и мехатроника". 2011. С. 67–75.
2. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Зуев А. В., Губанков А. С., Мурсалимов Э. Ш. Разработка метода совмещения трехмерных моделей обрабатываемых деталей с их CAD-

моделями при наличии деформаций // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 60–69.

3. Gubankov A., Gornostaev I. Development of method of forming signals for the actuators of manipulators with redundant degrees of mobility // Proceedings of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 1–4.

4. Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F. Redundant manipulators kinematics inversion // Scientific Research and Essays. 2011. Iss. 26, Vol. 6. P. 5462–5470.

5. Филаретов В. Ф., Губанков А. С., Горностаев И. В., Коноплин А. Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2018. Т. 25, № 1. С. 30–37.

6. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of the Int. Russian Automation Conf., Sochi, Russia. 2019. P. 1–6.

7. Филаретов В. Ф., Алексеев Ю. К., Лебедев А. В. Системы управления подводными роботами. М.: Круглый год, 2001. 288 с.

8. Фу, К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.

9. Gong M., Li X., Zhang L. Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 18662–18674.

10. Lu Sh., Gu Y., Zhao J., Jiang L. An Iterative Calculation Method for Solve the Inverse Kinematics of a 7-DOF Robot with Link Offset // Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 29, N. 4. P. 729–739.

11. Wan J., Wu H. T., Ma R., Zhang L. A study on avoiding joint limits for inverse kinematics of redundant manipulators using improved clamping weighted least-norm method // Journal of Mechanical Science and Technology. Vol. 32, N. 3. 2018. P. 1367–1378.

12. Tashani H., Farrokhi M. Real-time inverse kinematics of redundant manipulators using neural networks and quadratic programming: A Lyapunov-based approach, Robotics and Autonomous Systems. 2014. Vol. 62, N.6. P. 766–781.

13. Koker R. A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators // Engineering with Computers. 2013. P. 507–515.

14. Koker R. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization // Information Sciences, 2012. Vol. 222. P. 528–543.

15. Крейг Д. Дж. Введение в робототехнику: механика и управление, М.-Ижевск.: Институт компьютерных исследований, 2013. 564 с.

16. Борисов О. И., Громов В. С., Пыркин А. А. Методы управления робототехническими приложениями / Учеб. пособие, СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.

17. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы, М.: Наука, 1978. 400 с.

Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Freedom. Part I

V. F. Filaretov¹, filaretov@inbox.ru, A. S. Gubankov^{1, 2}, gubankov@iacp.dvo.ru,

I. V. Gornostaev^{1, 2}, gornostaev_iv@mail.ru,

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,

²Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: **Gornostaev I. V.**, Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: gornostaev_iv@mail.ru

Accepted on August 17, 2021

Abstract

The solution of task of maintaining the dynamic accuracy of control of working tools of multilink manipulators (MM) when they move along arbitrary spatial trajectories is presented in this paper. In this case, constructive restrictions in all degrees of freedom (DoF) of manipulators and special cases of location of their links are taken into account. These special (singular) positions are characterized by ambiguity in solving inverse kinematics problem of these MM. Maintaining of control accuracy is proposed to be ensured by excluding the enter of all DoFs of manipulators to the restrictions, as well as excluding the enter of their working tools to the boundaries of the working area. This is accomplished by using a redundant DoF when approaching these undesirable positions. In the first part of the article, the features of the new solution of the inverse kinematics problem are considered and singular positions for 6-DoF manipulators with PUMA kinematic schemes are described. The presented solution of the inverse kinematics problem takes into account various combinations of generalized coordinates of the MM, which ensure the movement of their working tools to the specified positions with the required spatial orientation. This solution has low computational complexity compared to other known methods. This allows the use of low-power microprocessor computers to control the MM. The results of the performed mathematical simulation confirmed the high efficiency of using the proposed approach to the contour control of the MM.

Keywords: multilink manipulator, redundant degree of freedom, restrictions, singular positions, inverse kinematics, dynamic accuracy

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (№ 19-08-00347 and 20-08-00701).

For citation:

Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Freedom. Part I, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 23–30.

DOI: 10.17587/mau.23.23-30

References

1. Filaretov V. F., Zuev A. V., Gubankov A. S. The development of a robotics system for machining nonrigid spatial composite parts for helicopters, *Izvestiya VUZov, Mashinostroenie, Special'nyj vypusk "Special'naya robototekhnika i mekhatronika"*, 2011, pp. 67–75 (in Russian).
2. Filaretov V. F., Yuxhimets D. A., Zuev A. V., Gubankov A. S., Mursalimov E. Sh. The method of development of combination of three-dimensional models of processed details with their CAD-models at the presence of deformations, *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii*, 2016, no. 3, pp. 60–69.
3. Gubankov A., Gornostaev I. V. Development of method of forming signals for the actuators of manipulators with redundant degrees of mobility, *Proceedings of Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1–4.
4. Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H. A. F. Redundant manipulators kinematics inversion, *Scientific Research and Essays*, 2011, iss. 26, vol. 6, pp. 5462–5470.
5. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V., Konoplin A. Yu. Development of formation method of program control signals of manipulators installed on underwater vehicles, *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 30–37 (in Russian).
6. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of the Int. Russian Automation Conf.*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1–6.
7. Filaretov V. F., Alekseev Yu. K., Lebedev A. V. Underwater robot control systems, Moscow, Kruglyj god, 2001, 288 p. (in Russian).
8. Fu. K., Gonzalez R., Lee K. Robotics: control, sensing, vision, and intelligence, Moscow, Mir, 1989, 624 p. (in Russian).
9. Gong M., Li X., Zhang L. Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 18662–18674.
10. Lu Sh., Gu Y., Zhao J., Jiang L. An Iterative Calculation Method for Solve the Inverse Kinematics of a 7-DOF Robot with Link Offset, *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 29, no. 4, pp. 729–739.
11. Wan J., Wu H. T., Ma R., Zhang L. A study on avoiding joint limits for inverse kinematics of redundant manipulators using improved clamping weighted least-norm method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32, no. 3, pp. 1367–1378.
12. Toshani H., Farrokhi M. Real-time inverse kinematics of redundant manipulators using neural networks and quadratic programming: A Lyapunov-based approach, *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, vol. 62, no. 6, pp. 766–781.
13. Koker R. A neuro-simulated annealing approach to the inverse kinematics solution of redundant robotic manipulators, *Engineering with Computers*, 2013, pp. 507–515.
14. Koker R. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization, *Information Sciences*, 2012, vol. 222, pp. 528–543.
15. Craig J. J. Introduction to robotics: mechanics and control, Pearson Education International, 2005, 400 p.
16. Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A. Robotic application control techniques: study guide, St. Petersburg, ITMO University, 2016, 108 p. (in Russian).
17. Popov E. P., Vereshchagin A. F., Zenkevich S. L. Manipulation robots: dynamics and algorithms, Moscow, Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).

Т. П. Рыжова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., tatiana281186@yandex.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Метод классификации рабочей зоны мобильного робота на основе анализа трехмерного облака точек

Одной из основных и наиболее сложных задач при разработке систем автодвижения является классификация рабочей зоны мобильного робота. По результатам классификации строится локальная карта местности, с помощью которой затем осуществляется планирование траектории движения робота. В статье предложен метод классификации рабочей зоны автономного мобильного робота, перемещающегося в условиях пересеченной местности. Разработанный метод классификации основан на анализе трехмерного облака точек, полученного лазерным сканирующим 3D-дальномером. Использование сканирующего лазерного дальномера позволяет выполнять классификацию зоны движения робота в любое время суток и года. Предложен набор классификационных признаков, вычисление которых осуществляется с использованием метода наименьших квадратов и элементов теории вероятностей и математической статистики. Классификация рабочей зоны робота проводится по четырем классам: "Ровная поверхность", "Малая неровность", "Большая неровность" и "Препятствие". Каждый класс характеризует степень проходимости поверхности, по которой происходит движение робота. Результаты классификации сохраняются в виде локальной карты проходимости. В каждую ячейку такой карты записывается число, которое характеризует проходимость участка рабочей зоны, ограниченного данной ячейкой. Разработанный классификатор интегрирован в состав бортовой системы управления колесным мобильным роботом. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных в условиях пересеченной местности в различное время года и суток и подтверждающие работоспособность и эффективность предложенного метода классификации. Определена точность распознавания классов рабочей зоны мобильного робота. Разработанный классификатор успешно работает в различных условиях, в том числе зимой и в сумерках, но при этом имеет ограничения при работе в условиях естественных шумов, таких как дождь, снег. Средняя точность классификации при минимальном влиянии шумов естественного происхождения составляет 92,3 %, а время выполнения каждой итерации не превышает 0,085 с, что позволяет использовать разработанный классификатор в составе бортовых систем управления автономными мобильными роботами.

Ключевые слова: классификация, автономный мобильный робот, рабочая зона, облако точек, лазерный сканирующий 3D-дальномер, локальная карта проходимости, метод наименьших квадратов, дисперсия

Введение

В настоящее время находят широкое применение мобильные робототехнические комплексы, способные перемещаться в автоматическом режиме в заранее неизвестных средах с препятствиями. Разработки в данной области ведутся в России и за рубежом в таких компаниях, как Tesla, General Motors, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Nissan, Google, Яндекс, ПАО "КАМАЗ", НПО СтарЛайн, Cognitive Technologies и других [1–4].

Одной из основных и наиболее сложных задач при разработке систем автодвижения является классификация рабочей зоны мобильного робота. По результатам классификации строится локальная карта местности, с помощью которой затем осуществляется планирование траектории движения робота.

За последнее десятилетие как в России, так и за рубежом было проведено множество исследований в данной предметной области. В некоторых случаях для выполнения классификации использовалось видеоизображение местности, окружающей транспортное

средство [5–9]. При этом в ряде работ видеоизображение является основным источником информации о рабочей зоне [6, 7]. Но такой подход, как правило, не позволяет получить требуемые точность, надежность и производительность. Поэтому в большинстве работ визуальная информация комплексируется с данными какой-либо другой природы (например, с тепловизионной или аудиоинформацией) или является вспомогательной [5, 8, 9].

В настоящее время наиболее перспективным направлением считается анализ трехмерного облака точек рабочей зоны, полученного с помощью лазерного сканирующего дальномера или системы стереозрения. Использование таких сенсорных систем для решения задачи классификации отражено в работах [10–14].

Преимуществом лазерных дальномеров, особенно по сравнению с видеокамерами, является отсутствие зависимости от внешних источников света, что обеспечивает возможность работы в любое время суток и года. Таким образом, лазерные дальномеры сегодня стали стандартным оборудованием для создания систем управления мобильными роботами. Они по-

зволяют получить информацию о рабочей зоне, достаточную для определения проходимости и построения траектории в целевую точку.

В статье рассматривается разработанный метод классификации рабочей зоны автономного мобильного робота, перемещающегося в условиях пересеченной местности. В основе метода лежит анализ трехмерного облака точек, полученного лазерным сканирующим 3D-дальномером.

Постановка задачи

Наибольшую сложность представляет классификация недетерминированных динамически изменяющихся сред. Изменение среды обусловлено следующими факторами: время года и суток, метеорологические условия, особенности ландшафта, наличие различных статических и динамических объектов (здания, машины, люди и т. п.). Необходимо обеспечить устойчивость методов классификации по отношению к перечисленным факторам. Наиболее устойчивыми являются методы, основанные на анализе трехмерного облака точек рабочей зоны. Такое облако может быть получено, например, с помощью трехмерного сканирующего лазерного дальномера или системы стереозрения.

Построение локальной карты рабочей зоны напрямую связано с классификацией поверхности движения робота. Локальная карта представляет собой цифровое описание рабочей среды с определением зон, в которых робот может безопасно двигаться с заданной скоростью.

Результаты классификации рабочей зоны робота сохраняются в виде сетчатой карты локальной проходимости. В каждую клетку (ячейку) такой карты записывается число, которое характеризует проходимость участка рабочей зоны, ограниченного данной ячейкой.

Метод классификации рабочей зоны

Каждое измерение датчика представляет собой трехмерное облако точек (рис. 1, см. вторую сторону обложки), анализ которого позволяет классифицировать рабочую зону мобильного робота. Точки трехмерного облака проецируются на горизонтальную плоскость. При этом каждая спроецированная точка принадлежит одной из ячеек локальной карты. Далее каждая ячейка классифицируется с помощью специального набора признаков, включающего:

- максимальное отклонение от среднего значения высоты точек, спроецированных в данную ячейку;
- угол наклона усредненной плоскости, образованной точками данной ячейки;
- дисперсию высот точек, принадлежащих данной ячейке.

Рассмотрим вычисление каждого признака подробнее.

Максимальное отклонение от среднего значения высоты точек для каждой i -й ячейки локальной карты определяется следующим образом (рис. 2). Сначала вычисляется среднее значение $\bar{z}_i$ координаты z точек, проекции которых принадлежат данной ячейке, по формуле

$$\bar{z}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij},$$

где n_i — число точек, принадлежащих i -й ячейке; z_{ij} — координата z -й точки, принадлежащей i -й ячейке, $j = 1, \dots, n_i$. Далее для каждой j -й точки каждой из ячеек вычисляется модуль отклонения координаты от вычисленного среднего значения:

$$\Delta z_{ij} = |z_{ij} - \bar{z}_i|.$$

В результате для каждой i -й ячейки карты можно найти максимальное среди всех точек данной ячейки значение отклонения координаты z от среднего значения:

$$\Delta z_i^{\max} = \max_j \{\Delta z_{ij}\}.$$

С помощью максимального отклонения можно детектировать ровные участки дорог, а также различные препятствия, расположенные в зоне движения робота.

Второй классификационный признак (угол наклона усредненной плоскости, образованной

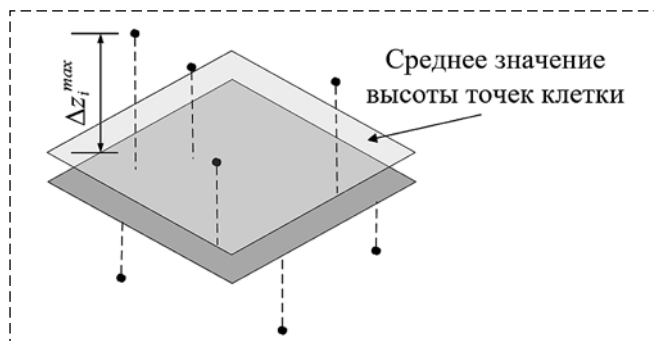


Рис. 2. Определение максимального отклонения от среднего значения высоты точек, спроецированных в ячейку карты
Fig. 2. Determination of the maximum deviation from the average value of the height of points projected into a map cell

точками классифицируемой ячейки карты) можно вычислить, используя метод наименьших квадратов. Для каждой i -й ячейки локальной карты по точкам, принадлежащим данной ячейке, методом наименьших квадратов строится плоскость $A_i x + B_i y + C_i = z$. Коэффициенты A_i , B_i и C_i определяются по формулам [15]

$$C_i = \frac{d_{i3} + k_{i13}d_{i1} + k_{i23}(d_{i2} + k_{i12}d_{i1})}{c_{i3} + k_{i13}c_{i1} + k_{i23}(c_{i2} + k_{i12}c_{i1})},$$

$$B_i = \frac{d_{i2} + k_{i12}d_{i1} - (c_{i2} + k_{i12}c_{i1})C_i}{b_{i2} + k_{i12}b_{i1}},$$

$$A_i = \frac{d_{i1} - b_{i1}B_i - c_{i1}C_i}{a_{i1}},$$

где

$$a_{i1} = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2, a_{i2} = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}y_{ij}, a_{i3} = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij},$$

$$b_{i1} = a_{i2}, b_{i2} = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}^2, b_{i3} = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij},$$

$$c_{i1} = a_{i3}, c_{i2} = b_{i3}, c_{i3} = \sum_{j=1}^{n_i} 1 = n_i,$$

$$d_{i1} = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}z_{ij}, d_{i2} = \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}z_{ij}, d_{i3} = \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij},$$

$$k_{i12} = \frac{-a_{i2}}{a_{i1}}, k_{i13} = \frac{-a_{i3}}{a_{i1}}, k_{i23} = \frac{-(b_{i3} + k_{i13}b_{i1})}{b_{i2} + k_{i12}b_{i1}}.$$

Здесь x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} — координаты j -й точки, принадлежащей i -й ячейке.

Косинус угла γ между вектором нормали $\mathbf{n}$ к данной плоскости и осью $\mathbf{z}$ в системе координат робота вычисляется по формуле [16] (рис. 3)

$$\cos \gamma_i = \frac{1}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + 1}}.$$

Вычисление угла наклона усредненной плоскости позволяет эффективно определять вертикальные поверхности, такие как, например, стены зданий, заборы и т. п. Кроме того, с помощью данного признака можно также детектировать ровные горизонтальные поверхности, например, дороги.

Дисперсия D_i высот точек, принадлежащих i -й ячейке, определяется по формуле

$$D_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (z_{ij} - \bar{z}_i)^2.$$

С помощью дисперсии можно отличить высокую траву от, например, за-

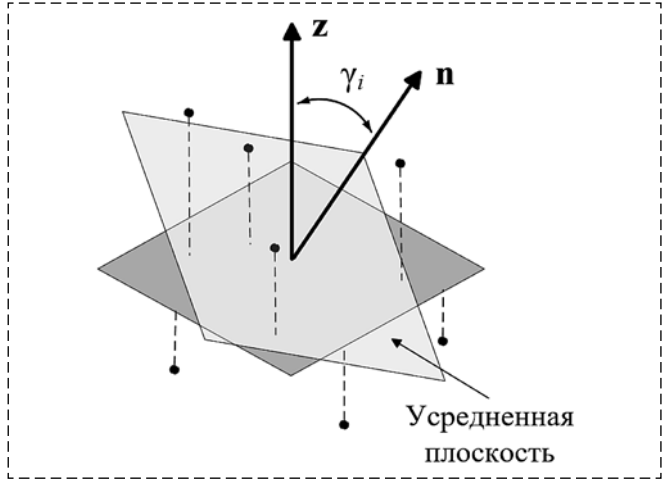


Рис. 3. Определение угла наклона усредненной плоскости, образованной точками, спроецированными в ячейку карты

Fig. 3. Determination of the angle of inclination of the averaged plane formed by points projected into a map cell

бора такой же высоты. На рис. 4 показано расположение точек облака в пространстве над ячейкой карты в случае обнаружения забора (рис. 4, а) и в случае детектирования травы (рис. 4, б). В первом случае точки расположены упорядоченно и определяются в вертикальной плоскости, во втором случае точки расположены хаотично и имеют различную высоту. При условии одинаковой максимальной высоты точек в первом случае дисперсия будет больше, чем во втором.

С помощью приведенного набора признаков классификация рабочей зоны робота проводится по четырем классам: "Ровная поверхность", "Малая неровность", "Большая неровность" и "Препятствие". Для каждого класса задаются соответствующие диапазоны значений классификационных признаков. В результате такой классификации каждой ячейке локальной карты присваивается один из этих четырех классов. В зависимости от номера класса каждой ячейке назначается число

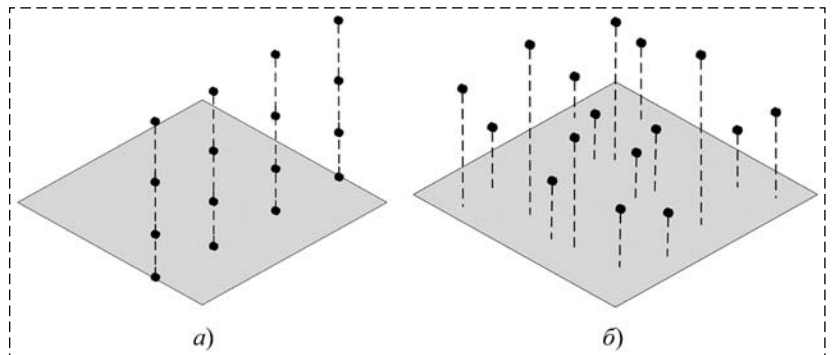


Рис. 4. Расположение точек в пространстве над ячейкой карты: забор (а) и трава (б)

Fig. 4. Location of points in space above the map cell: fence (a) and grass (b)

в диапазоне от 0 до 100, которое характеризует проходимость поверхности движения внутри данной ячейки (показатель проходимости): чем меньше это число, тем выше проходимость. Например, для класса "Ровная поверхность" показатель проходимости составляет 20 единиц, а для класса "Препятствие" — всегда 100.

Для наглядности на локальной карте рабочей зоны ячейки окрашены в разные цвета в соответствии с распознанными классами (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

Синим цветом обозначен класс "Ровная поверхность", сиреневым — "Малая неровность", малиновым — "Большая неровность", желтым — "Препятствие". Ячейкам карты, в которых классификация по каким-либо причинам не выполнялась (например, из-за отсутствия достаточного числа точек), присваивается неопределенный класс. Такие клетки окрашиваются серым цветом.

Точность классификации и размеры детектируемой зоны зависят от плотности анализируемого облака точек. С увеличением расстояния между датчиком и детектируемым объектом плотность получаемого облака снижается. Приведенный метод классификации является работоспособным в случае, когда число точек, спроецированных в ячейку карты, больше или равно трем.

Алгоритмическая и программная реализация классификатора

Алгоритм, реализующий работу предложенного классификатора, на каждой итерации включает следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Получение трехмерного облака точек рабочей зоны в заданной окрестности робота.

Шаг 2. Проецирование точек трехмерного облака на горизонтальную плоскость локальной карты.

Шаг 3. Определение для каждой ячейки карты набора спроецированных точек, принадлежащих этой клетке.

Шаг 4. Вычисление для каждой ячейки карты значений классификационных признаков.

Шаг 5. Классификация каждой ячейки карты путем проверки принадлежности полученных значений классификационных признаков заданным диапазонам значений, которые соответствуют определяемым классам.

Шаг 6. Присвоение каждой ячейке карты числа в диапазоне от 0 до 100 в зависимости от номера класса, определенного на шаге 5.

Программная реализация разработанного классификатора выполнена на языке C++ с использованием среды разработки Robot Operating System (ROS) и библиотеки Point Cloud Library (PCL).

Апробация разработанного метода классификации

Апробация разработанного метода проводилась с помощью колесного мобильного робота, на борту которого установлен трехмерный лазерный сканирующий дальномер Velodyne HDL-32E. Технические характеристики Velodyne HDL-32E позволяют выполнять классификацию рабочей зоны размером 150×150 м, угол обзора составляет 360° .

Вычисления выполнялись с помощью бортового компьютера на базе процессора Intel Core i7 с частотой 1.7 ГГц под управлением операционной системы Ubuntu 18.04 LTS семейства Linux.

На рис. 6 (см. вторую сторону обложки), на рис. 7, 8 (см. третью сторону обложки) и на рис. 9, 10 (см. четвертую сторону обложки) приведены изображения рабочей зоны робота, полученные бортовой видеокамерой, и соответствующие результаты классификации, полученные с помощью разработанного метода и представленные в виде построенной локальной карты местности. Кроме того, на карте отображены оси системы координат робота. Размер ячейки карты составляет 0,2 м.

Классификация выполнялась в зимнее время и весной. На приведенных рисунках показана карта, на которой четко отображена дорога, что соответствует классу "Ровная поверхность". Также класс "Ровная поверхность" присваивается заснеженным равнинным участкам. Сугробы по бокам дороги классифицированы как "Большая неровность", небольшие комья снега и колея классифицированы как "Малая неровность", деревья, кусты и здания — как "Препятствие".

Проведенные исследования показали, что время обработки облака точек и построения локальной карты местности на каждой итерации не превышает 0,085 с. Для обеспечения работы классификатора в режиме "мягкого" реального времени значение этого параметра не должно превышать 0,1 с.

В таблице приведена точность распознавания классов рабочей зоны мобильного робота, полученная в результате проведения 100 экс-

Наименование класса	"Ровная поверхность"	"Малая неровность"	"Большая неровность"	"Препятствие"
Точность, %	95,4	88,9	93,6	91,3

периментов. Исследования проводились в условиях отсутствия осадков, которые создают помехи работе лазерного дальномера.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают работоспособность и эффективность предложенного метода классификации зоны движения робота. Средняя точность классификации составляет 92,3 %. Кроме того, разработанное программное обеспечение позволяет выполнять классификацию зоны движения робота в режиме "мягкого" реального времени.

Заключение

Достоинством разработанного подхода к классификации рабочей зоны мобильного робота по сравнению с методами, основанными на анализе видеоизображения, является широкий диапазон условий эксплуатации. Разработанный классификатор успешно работает в различных условиях, в том числе зимой и в сумерках, но при этом имеет ограничения при работе в условиях естественных шумов, таких как дождь, снег. Средняя точность классификации при минимальном влиянии шумов естественного происхождения составляет 92,3 %, а время выполнения каждой итерации не превышает 0,085 с, что позволяет использовать данный классификатор в составе бортовых систем управления автономными мобильными роботами.

В будущем планируется подключение слоев карты, формируемых с помощью других сенсорных систем, таких как, например, тепловизионный датчик, стереопара и т. п. Предполагается, что такие системы будут давать дополнительную информацию по каждой клетке локальной карты, что особенно важно в спорных случаях, когда лазерный дальномер может давать ошибочную информацию, например во время снегопада.

Список литературы

1. **Беспилотные** автомобили: прошлое, настоящее и будущее // hub.forklog.com. URL: <https://hub.forklog.com/be->

pilotnye-avtomobili-proshloe-nastoyashhee-i-budushhee/ (дата обращения 09.06.2021).

2. **Софрыгин А.** Беспилотный автомобиль Яндекс // беспилот: беспилотные авто и технологии, новости и каталог компаний. URL: <https://bespilot.com/news/366-yandex-bespilot> (дата обращения 09.06.2021).

3. **"КАМАЗ"** начал тестирование беспилотника // kamaz.ru: Официальный сайт ПАО "КАМАЗ". URL: https://kamaz.ru/press/news/kamaz_nachal_testirovanie_bespilotnika/ (дата обращения 09.06.2021).

4. **Беспилотный** автомобиль StarLine. URL: <https://smart-car.starline.ru> (дата обращения 09.06.2021).

5. **Haselich M., Arends M., Lang D., Paulus D.** Terrain Classification with Markov Random Fields on fused Camera and 3D Laser Range Data. URL: http://aass.oru.se/Agora/ECMR2011/proceedings/papers/ECMR2011_0025.pdf (дата обращения 27.05.2021).

6. **Iagnemma K., Dubowsky S.** Terrain estimation for high-speed rough-terrain autonomous vehicle navigation. URL: http://robots.mit.edu/people/Karl/SPIE_02.pdf (дата обращения 27.05.2021).

7. **Lee S. Y., Kwak D. M.** A Terrain Classification Method for UGV Autonomous Navigation Based on SURF. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6145981 (дата обращения 27.05.2021).

8. **Nguyen D. V., Kuhnert L., Jiang T., Kuhnert K. D.** A Novel Approach of Terrain Classification for Outdoor Automobile Navigation. URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5952752 (дата обращения 29.05.2021).

9. **Laible S., Khan Y. N., Bohlmann K., Zell A.** 3D LIDAR- and Camera-Based Terrain Classification Under Different Lighting Conditions // Proceedings of Conference: Autonomous Mobile Systems. 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/231681273_3D_LIDAR_and_Camera-Based_Terrain_Classification_Under_Different_Lighting_Conditions (дата обращения 29.05.2021).

10. **Himmelsbach M., Muller A., Luttel T., Wunsche H. J.** LIDAR-based 3D Object Perception // Proceedings of 1st International Workshop on Cognition for Technical Systems. Munich (Germany), 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/229018428_LIDAR-based_3D_object_perception (дата обращения 29.05.2021).

11. **Woods M., Guivant J., Katupitiya J.** Terrain Classification using Depth Texture Features // Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA). 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/273093294_Terrain_Classification_using_Depth_Texture_Features (дата обращения 31.05.2021).

12. **Kragh M., Jorgensen R. N., Pedersen H.** Object Detection and Terrain Classification in Agricultural Fields Using 3D Lidar Data // Springer International Publishing Switzerland. 2015. P. 188–197.

13. **Reymann C., Lacroix S.** Improving LiDAR Point Cloud Classification using Intensities and Multiple Echoes // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015). Hamburg (Germany), 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/308845174_Improving_LiDAR_point_cloud_classification_using_intensities_and_multiple_echoes (дата обращения 31.05.2021).

14. **Suger B., Steder B., Burgard W.** Terrain-Adaptive Obstacle Detection // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016). Daejeon (Korea), 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/312241137_Terrain-adaptive_obstacle_detection (дата обращения 31.05.2021).

15. **Аппроксимация** эмпирически полученной поверхности методом наименьших квадратов // Королевство Delphi. Виртуальный клуб программистов. URL: <http://www.delphi-kingdom.com/asp/viewitem.asp?catalogid=1368> (дата обращения 09.06.2021).

16. **Лаптев Г. Ф.** Элементы векторного исчисления. М.: Наука, 1975. 336 с.

Method of Classification the Mobile Robot Workspace Based on the Analysis of a 3D Point Cloud

T. P. Ryzhova, tatiana281186@yandex.ru,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Ryzhova Tatiana P.**, Ph.D., Senior Researcher, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: tatiana281186@yandex.ru

Accepted on September 23, 2021

Abstract

One of the main and most difficult tasks in the development of automotive systems is the classification of the workspace of a mobile robot. Based on the classification results, a local map of the area is built, with the help of which, then, the robot trajectory is planned. The article describes a method of classification the working area of an autonomous mobile robot moving in rough terrain. The developed classification method is based on the analysis of a three-dimensional point cloud obtained by a laser scanning 3D rangefinder. Using a scanning laser rangefinder allows you to classify the robot's motion zone at any time of the day or year. A set of classification features is proposed, the calculation of which is carried out using the least square method and elements of probability theory and mathematical statistics. The classification of the robot workspace is carried out by four classes: "Flat surface", "Small roughness", "Large roughness" and "Obstacle". Each class characterizes the degree of passability of the robot movement surface. Classification results are saved as a local map of passability. In each cell of such a map a number is written that characterizes the passability of the region of the working area bounded by this cell. The developed classifier is integrated into the on-board control system of the wheeled mobile robot. The results of experimental studies confirming the efficiency and effectiveness of the proposed classification method are presented. The accuracy of class recognition of the mobile robot workspace has been determined. The developed classifier successfully operates in various conditions, including in winter and at dusk, but at the same time it has limitations when working in conditions of natural noise, such as rain, snow. The average classification accuracy with the minimal influence of natural noise is 92.3 %, and the execution time of each iteration does not exceed 0.085 s, which allows using developed classifier as a part of on-board control systems of autonomous mobile robots.

Keywords: classification, autonomous mobile robot, workspace, point cloud, laser scanning 3D rangefinder, local map of passability, rough terrain, classification features, least squares method, dispersion

For citation:

Ryzhova T. P. Method of Classification the Mobile Robot Workspace Based on the Analysis of a 3D Point Cloud, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 31–36.

DOI: 10.17587/mau.23.31-36

References

1. **Unmanned** car: past, present and future, available at: <https://hub.forklog.com/bespilotnye-avtomobili-proshloe-nastoyashhee-i-budushhee/> (in Russian).
2. **Sophrygin A.** Unmanned car Yandex, *bespilot: unmanned vehicles and technologies, news and catalog of companies*, available at: <https://bespilot.com/news/366-yandex-bespilot> (in Russian).
3. **"KAMAZ"** began testing the unmanned car, *kamaz.ru: Official site of KAMAZ*, available at: https://kamaz.ru/press/news/kamaz_nachal_testirovanie_bespilotnika/ (in Russian).
4. **Unmanned** car StarLine, available at: <https://smartcar.starline.ru> (In Russian).
5. **Haselich M., Arends M., Lang D., Paulus D.** Terrain Classification with Markov Random Fields on fused Camera and 3D Laser Range Data, available at: http://aass.oru.se/Agora/ECMR2011/proceedings/papers/ECMR2011_0025.pdf.
6. **Iagnemma K., Dubowsky S.** Terrain estimation for high-speed rough-terrain autonomous vehicle navigation, available at: http://robots.mit.edu/people/Karl/SPIE_02.pdf.
7. **Lee S. Y., Kwak D. M.** A Terrain Classification Method for UGV Autonomous Navigation Based on SURF, available at: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6145981.
8. **Nguyen D. V., Kuhnert L., Jiang T., Kuhnert K. D.** A Novel Approach of Terrain Classification for Outdoor Automobile Navigation, available at: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5952752.
9. **Laible S., Khan Y. N., Bohlmann K., Zell A.** 3D LIDAR and Camera-Based Terrain Classification Under Different Lighting Conditions, *Proceedings of Conference: Autonomous Mobile Systems*, September 2012, available at: https://www.researchgate.net/publication/231681273_3D_LIDAR_and_Camera-Based_Terrain_Classification_Under_Different_Lighting_Conditions.
10. **Himmelsbach M., Muller A., Luttel T., Wunsche H. J.** LIDAR-based 3D Object Perception, *Proceedings of 1st International Workshop on Cognition for Technical Systems*, October 2008, Munich, Germany, available at: https://www.researchgate.net/publication/229018428_LIDAR-based_3D_object_perception.
11. **Woods M., Guivant J., Katupitiya J.** Terrain Classification using Depth Texture Features, *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, December 2013, available at: https://www.researchgate.net/publication/273093294_Terrain_Classification_using_Depth_Texture_Features.
12. **Kragh M., Jorgensen R. N., Pedersen H.** Object Detection and Terrain Classification in Agricultural Fields Using 3D Lidar Data, *Springer International Publishing Switzerland*, 2015, pp. 188–197.
13. **Reymann C., Lacroix S.** Improving LiDAR Point Cloud Classification using Intensities and Multiple Echoes, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015)*, September 2015, Hamburg, Germany, available at: https://www.researchgate.net/publication/308845174_Improving_LiDAR_point_cloud_classification_using_intensities_and_multiple_echoes.
14. **Suger B., Steder B., Burgard W.** Terrain-Adaptive Obstacle Detection, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016)*, October 9–14, 2016, Daejeon, Korea, available at: https://www.researchgate.net/publication/312241137_Terrain-adaptive_obstacle_detection.
15. **Approximation** of an empirically obtained surface by the least squares method, *Korolevstvo Delphi. Virtualnyy klub programmistov*, available at: <http://www.delphikingdom.com/asp/viewitem.asp?catalogid=1368> (in Russian).
16. **Laptev G. F.** Elements of vector calculations, Moscow, Nauka, 1975, 336 p. (in Russian).

O. V. Karsaev, PhD, Senior Researcher, karsaev@ips-logistic.com,
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Karsaev O. V.**, PhD, Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: karsaev@ips-logistic.com

Accepted on October 07, 2021

A Conceptual Model of Remote Sensing Data Routing in the Grouping of Communication Satellites of a Multi-Satellite Space System

Abstract

The use of low-orbit constellation of small or super-small satellites for solving problems of remote sensing of the Earth is a promising direction for the development of space activities. In order to ensure the communication of these satellites with ground-based points in advanced space systems, it is planned to use groupings of low-orbit communication satellites. At that, a certain formation of this grouping is considered. It is assumed that the satellites are evenly distributed in several orbital planes, and each of them has a connection with two neighboring satellites in its plane and two satellites in neighboring planes. The object of research in the article is the problem of routing, namely, the search for routes for relaying data streams from remote sensing satellites to ground-based information reception points. The proposed approach to solving the routing problem uses the following network specifics. The nodes of the network are remote sensing satellites, communication satellites and objects of ground infrastructure. In this case, you can highlight two fragments of the network. Communication satellites form the first fragment of the network, and the second one — the communication channels of these satellites with ground infrastructure objects and remote sensing satellites. The topology of the first network fragment is static, and the topology of the second fragment is dynamically changing. However, the dynamics of changes in the topology of this network fragment is predictable. It can be calculated based on satellite flight simulations and described as a contact plan that defines the time parameters of satellite communication sessions with ground stations. The solution of the problem is based on an agent-based approach. Satellite agents form the overlay layer of the network and, based on information interaction, provide route search, traffic balancing, and data transmission without delays at network nodes. The article offers information interaction schemes that provide both centralized and distributed route search options.

Keywords: multi-satellite space system, groupings of remote sensing and satellite communications satellites, routing

Acknowledgements: The research described in this paper is partially supported by the state research 0073—2019—0004.

For citation:

Karsaev O. V. A Conceptual Model of Remote Sensing Data Routing in the Grouping of Communication Satellites of a Multi-Satellite Space System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 37—44.

DOI: 10.17587/mau.23.37-44

УДК 004.773

DOI: 10.17587/mau.23.37-44

О. В. Карсаев, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., karsaev@ips-logistic.com,
СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург

Концептуальная модель маршрутизации данных дистанционного зондирования Земли в группировке спутников связи многоспутниковой космической системы

Использование низкоорбитальных группировок малых или сверхмалых спутников для решения задач дистанционного зондирования Земли является одним из основных направлений развития космической деятельности. Для обеспечения связи этих спутников с наземными пунктами в перспективных космических системах предполагается использовать группировку низкоорбитальных спутников связи. При этом рассматривается определенное построение этой группировки. Полагается, что спутники равномерно распределены в нескольких орбитальных плоскостях, и каждый из них имеет связь с двумя соседними спутниками в своей плоскости и двумя спутниками в соседних плоскостях. Объектом исследований в статье является задача маршрутизации, а именно поиск маршрутов для ретрансляции потоков данных со спутников дистанционного зондирования в наземные пункты приема информации.

В предлагаемом подходе к решению задачи маршрутизации используется следующая специфика сети. Узлами сети являются спутники дистанционного зондирования, спутники связи и объекты наземной инфраструктуры. При этом можно выделить два фрагмента сети. Первый фрагмент сети образуют спутники связи, а второй фрагмент — каналы связи этих спутников с объектами наземной инфраструктуры и спутниками дистанционного зондирования. Топология первого фрагмента сети является постоянной, а топология второго фрагмента — динамически изменяющейся. Однако динамика изменения топологии этого фрагмента сети является предсказуемой. Она может рассчитываться на основе моделирования полета спутников и описываться в виде плана контактов, определяющего временные параметры сеансов связи спутников с наземными пунктами. В основе решения задачи лежит агентно-ориентированный подход. Агенты спутников образуют оверлейный слой сети и на основе информационного взаимодействия обеспечивают поиск маршрутов, балансировку трафика и передачу данных без задержек в узлах сети. В статье предлагаются схемы информационного взаимодействия, обеспечивающие как централизованный, так и распределенный варианты поиска маршрутов.

Ключевые слова: многоспутниковая космическая система, группировки спутников дистанционного зондирования Земли и спутников связи, маршрутизация данных

Introduction

Remote sensing of the Earth (ERS) is currently one of the most demanded space technologies. The growth of a service market in this area is predicted to reach \$8.5 billion by 2026 [1]. Further development of ERS technologies is associated with use of small, micro, and mini satellites, and creation of multi-satellite space systems. The development and creation of such systems requires the study of many problems from various subject areas [2]. These include the routing of remote sensing data transmission to the Earth, which is the object of research in this paper.

One of the main factors that determine the choice of approach to its solution is the orbital formation of satellite constellation, the structure and dynamics of changes in the network topology over time, and the type of network connectivity [3].

Depending on the orbital formation and the size of the satellite constellation, the network can be fully connected or non-connected. In the case of connected networks, routing algorithms [4–13] used on the Internet, in terrestrial communication networks, as well as in MANET (Mobile Ad-hock Network) networks are considered. In the case of non-connected networks, technologies that differ from the protocols on which the Internet is built are considered. The development of such technologies led to the development of DTN architecture (Delay-and-Disruption Tolerant Networking) [14]. For data routing in DTN, CGR algorithm (Contact Graph Routing) is considered, which is the object of active research and development [15–22].

The paper is organized as follows. The first section describes a variant of building a space system and setting the routing problem. The second section provides an analysis of the network topology specifics and the dynamics of its changes. The network as a whole belongs to the class of MANET networks.

Despite this, the expediency of using a contact plan, which is used in the basis of the CGR algorithm, is justified. The solution of the routing problem involves information interaction. Possible interaction schemes are discussed in the third, fourth and fifth sections of the article.

1. Problem statement

A multi-satellite space system is considered, including groupings of remote sensing and communication satellites. It is assumed that the communication satellites are uniformly located in several orbital planes, and each satellite always has a connection with two neighbors in its plane and two neighbors in adjacent planes. This network formation, in particular, is implemented in the grouping of Iridium communication satellites [23], consisting of 66 satellites, 11 satellites in 6 orbital planes. In the case of such a formation, the network topology has the form of a grid (Fig. 1), and communication satellites can be identified by the indices i and j , where i is the ordinal number of the plane, and j is the ordinal number of the satellite in the plane.

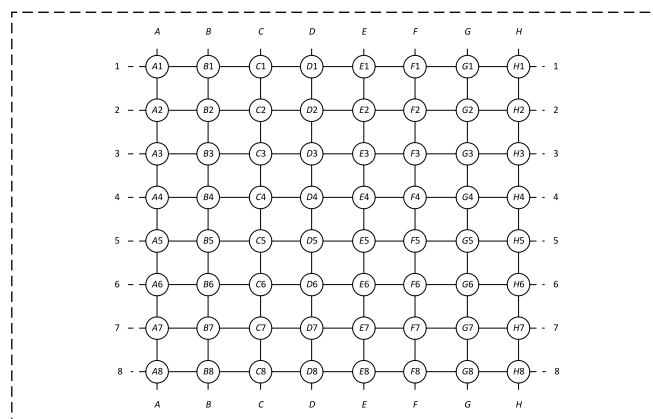


Fig. 1. Identification of communication satellites

The communication satellite for the duration of the communication session with the ground point will be called a terminal or terminal satellite, and the purpose of the task is to find routes to the terminal satellites that have communication sessions with the corresponding ground points. Route search should be performed taking into account the possibility of peak situations and traffic balancing.

The performance of the space system has a limitation: the total volume of data obtained as a result of the execution of ERS requests within a certain period of time should not exceed the maximum volume that can be transmitted within the same period of time within all communication sessions with ground points. This restriction can be taken into account when forming the flow of ERS requests. However, the traffic intensity may fluctuate, and peak situations may occur within some time intervals: the total volume of data held by communication satellites exceeds the capacity of the currently established communication sessions with ground stations.

A terminal satellite can simultaneously relay to the ground station 4 data streams received from 4 neighboring satellites. However, in the case of the network topology under consideration, this restriction may have additional specifics (Fig. 2). In the first case, only 6 streams can be retransmitted instead of 8, in the second case, only 8 streams instead of 12.

The second problem is traffic balancing. If the communication channel is used simultaneously in two routes, then the time of retransmission of streams on these routes is doubled. Thus, the routing problem is considered, which is reduced to the choice of terminals and routes for retransmitting data streams with respect to the restrictions on the intersection of routes and taking into account the possibility of peak situations.

In the case of peak situations, congestions of transmitted data may occur at the network nodes. In this regard, three possible routing strategies can be considered. In the first strategy, data transmission from remote sensing satellites begins only if there is route, the use of which does not cause congestion occurrence at the nodes of the route. In the second strategy, data transfer can occur if congestions

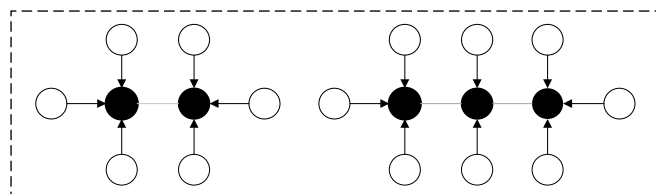


Fig. 2. Specifics of network performance limitations

tion can only occur at terminal nodes. In the third strategy, it is allowed that congestion can occur at any intermediate nodes of the route. This article discusses the first of three routing strategies.

2. The specifics of network topology and dynamics of its changes

In the case of the formation under consideration, communication satellites form a network with a static topology. However, due to the mobility of satellites, the problem has a dynamic component, which can be explained using Fig. 3.

In this example, it is assumed that the data transmission occurs in the time interval between t^0 and t^4 . During this time, the remote sensing satellite has contacts with different communication satellites Sat^1 , Sat^2 and Sat^3 , and the ground station — with different terminal satellites Sat^{T1} , Sat^{T2} and Sat^{T3} . Thus, the data transmission is divided into 4 time intervals. Within the first time interval $[t^0, t^1]$, the source and destination nodes of data transmission are Sat^1 and Sat^{T1} satellites, respectively, within the second time interval $[t^1, t^2]$ — Sat^2 and Sat^{T1} satellites, etc.

In the case of such changes in the network topology, MANET routing methods assume broadcast distribution of service messages. But in the case of space systems, such changes can be calculated on the basis of satellite flight simulations and described in the form of a contact plan

$$Contact\ plan = \{ \langle Sat, node, [t^S, t^F] \rangle \},$$

that specifies the time intervals $[t^S, t^F]$ of the planned sessions of each communication satellite Sat with each other $node$ of network: ground station and remote sensing satellite. When using such data, the transmission of service messages about changes in the network topology becomes unnecessary.

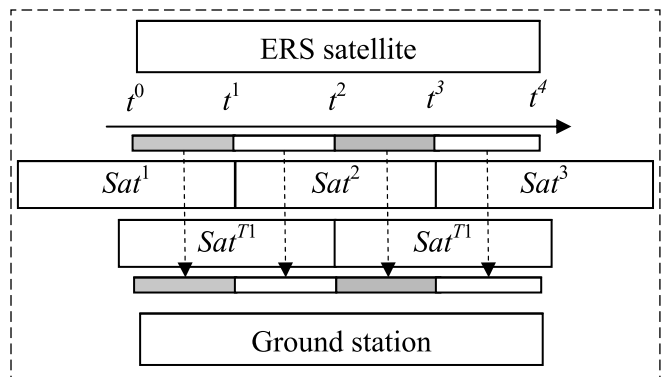


Fig. 3. Dynamics of network topology changes

3. Information interaction of remote sensing and communication satellites

Information interaction between satellites can be implemented on the basis of an agent-based approach. In this approach, it is assumed that each satellite has its own agent. In accordance with this, a multiagent system can be considered as an overlay layer of a communication network. This section discusses the behavior and interaction models of remote sensing satellite and communication satellite agents.

3.1. Behavior model of remote sensing satellite agent

The behavior model of the remote sensing satellite agent in the form of a state chart is shown in Fig. 4.

When observation data appears (1), the agent goes from the data waiting state to the waiting state for contact with a communication satellite. The time intervals when the remote sensing satellite can establish these contacts are available in its contact plan. When the earliest moment of contact start time (2) occurs, it sends a request to the corresponding communication satellite *Sat* to establish contact:

Sat: Communication request.

If a contact is not established for some reason (3), it goes to the waiting state for the next contact, otherwise (4) sends a request to the *Sat* satellite agent to search for a route and transmit data:

Sat: Transmission request.

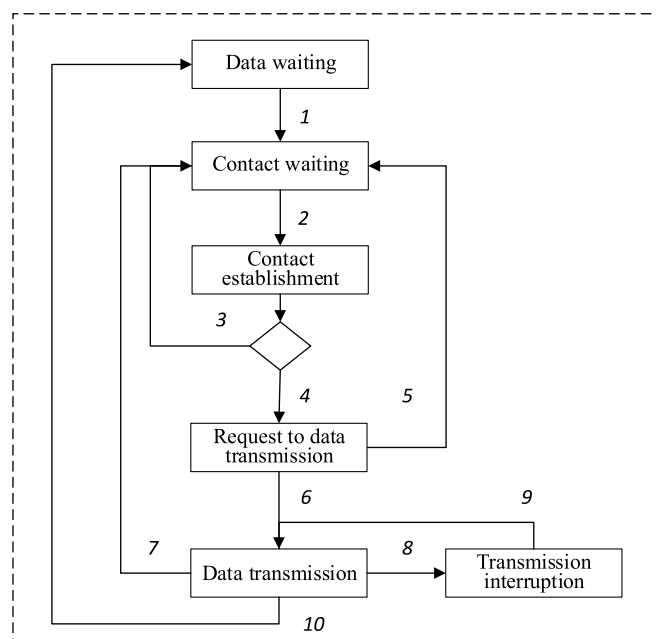


Fig. 4. Behavior model of remote sensing satellite agent

In accordance with the routing strategy under consideration, data transmission begins on the condition that there is a route that does not cause congestion at the nodes of the route. There may not be such a route in the time interval of the current contact. In this case, when the end time of the current contact occurs (5), the agent enters the waiting state for the next contact.

If the route is found, it receives the message *Transmission is possible* (6) and starts transmitting data before one of the following events 7, 8 or 10 occurs. If the time of the current contact is over (7), it goes into waiting for the next contact. If the *Transmission is interrupted* message is received (8), it enters the data transmission interruption state until the *Transmission is possible* message is received (9) to continue the data transfer. If all data is transmitted (10) before the end of the contact, the agent sends to the *Sat* communication satellite agent a message about this

Sat: Transmission is over,

and goes to the state of waiting for the next data to be transmitted.

3.2. Behavior model of communication satellite agent

The behavior model of the communication satellite agent in the form of a state chart is shown in Fig. 5. In the interaction of the agents of the remote sensing satellite and the communication satellite, the first of them is proactive. Therefore, the communi-

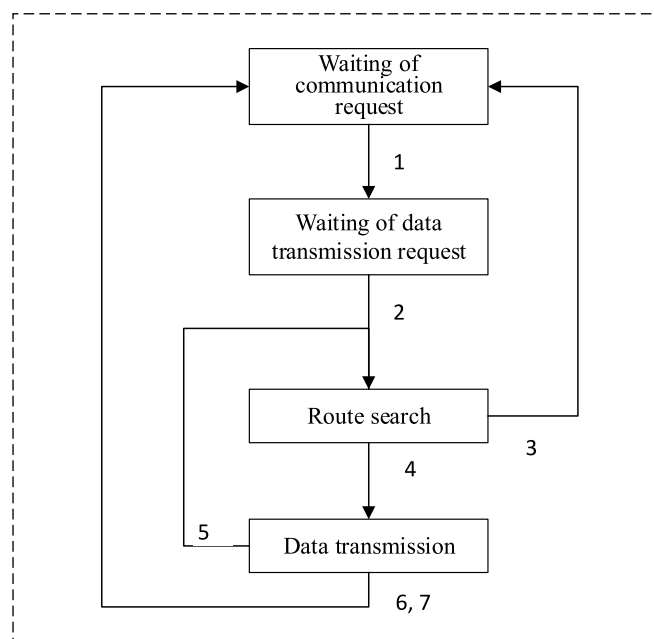


Fig. 5. Behavior model of communication satellite agent

cation satellite agent is waiting for a *Communication request* (1) message to establish a contact. After establishing the contact and receiving the *Transmission request* message (2), it initiates the route search process. This process is described in the next section of the article.

The satellite agent is in the route search state until one of the events 3 or 4 occurs. If the route is not found before the end of contact with the remote sensing satellite (3), it enters the waiting state for a new data request, otherwise (4) sends to the Sat^{ERS} remote sensing satellite agent a message about this

Sat^{ERS} : *Transmission is possible*,

and enters the data transmission state. It is in this state until one of the events 5, 6, or 7 occurs. When the communication session of the terminal satellite with the ground station is over (5), it sends a command to interrupt the data transmission

Sat^{ERS} : *Transmission interrupted*,

based on the contact plan, it determines the next terminal satellite and initiates the process of finding a route to it. When the contact with the Sat^{ERS} satellite ends (6), or the message *Transmission is over* comes (7), the agent of the communication satellite goes to the state of waiting for the next *Communication request*.

4. Interaction scheme of communication satellite agents

Route search can be performed in both centralized and distributed variants. In the first case, an additional *manager* agent is introduced, which searches for routes at the request of the communication satellite agents. In the second case, the communication satellite agents search for routes independently.

The route search is preceded by the choice of a terminal satellite. Initial data for this is the contact plan and the ground point where the ERS data should be delivered. The choice of a terminal satellite also involves information interaction with the agent of this satellite, the purpose of which is to confirm the establishment of a communication session with the ground point.

When searching for routes, we use up-to-date data on the state of inter-satellite communication channels, which are maintained in the *Network load* database. A channel can be in one of two states: it is used in an active route or not. In the centralized model, this database is maintained in the memory of the *manager*

agent, in the distributed model — in the memory of the agent of each communication satellite. The route search is performed using Dijkstra's algorithm [24]. The route length metric is the number of communication channels that make up the route.

4.1. Centralized routing model

A possible scheme of agent interaction in the case of a centralized model is shown in Fig. 6.

Here and after, the following designations are used: Sat^0 — a communication satellite receiving data from a remote sensing satellite, Sat^i , $i = 1, \dots, k$ — satellites of intermediate nodes of the stream relay route.

In accordance with the scheme, the satellite agent Sat^0 sends the *manager* agent a *Request* to search for a route. After searching and selecting a route, the *manager* agent sends an *Update* message to the agent of each Sat^i route node with a *Route* description in the form of an ordered list of route nodes:

Sat^i : *Update (Route)*, $i = 1, \dots, k$,
 $Route = \{Sat^j / j = 0, 1, \dots, k\}$.

Based on the route description, the node agents update their routing tables, and send a *Confirmation* message. After receiving confirmation from the agents of all the route nodes, the *manager* agent registers the new states of the route communication channels in the *Network load* database and sends the *Update* message to the Sat^0 satellite agent:

Sat^0 : *Update (Route)*.

When a message is received, the Sat^0 satellite agent updates the data in the routing table and sends the *Transmission is possible* message to the remote sensing satellite agent.

After transmitting the data stream, the Sat^0 satellite agent initiates a protocol with a similar scheme (Fig. 6), during which the *manager* agent updates the status of the communication channels

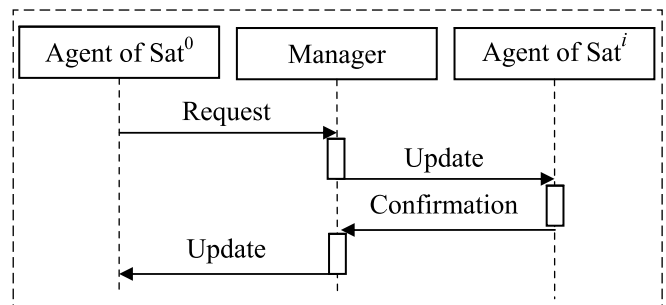


Fig. 6. Interaction scheme in case of a centralized model

used in the route in the *Network load* database, and the agents of the route nodes update the data in their routing tables.

The *manager* agent searches for routes sequentially, in the order in which requests are received. When peak situations occur, a queue of requests for which the route has not yet been found is formed in the memory of the *manager* agent. The search for routes for these queries resumes after updating the data in the *Network load* database due to the termination of the use of any of the existing routes.

In order to ensure reliability, the *manager* agent must have a duplicate agent that operates on another network node and synchronously updates the data in its *Network load* database. If one of these agents becomes unavailable, the other agent remains or becomes the primary agent, creates a new duplicate agent in the other node, sends it a copy of the *Network load* database, and broadcasts the agents of all communication satellites the address of the new duplicate agent.

4.2. Distributed routing model

In the case of a distributed routing model, the behavior scenario of the Sat^0 satellite agent in the "Route Search" state (Fig. 5) can be summarized as follows.

1. It searches for a route. If the route is not found, it resumes the search after waiting and receiving a message about the termination of the existence of an existing route.
2. When the route is found, it initiates the route validation protocol. Participants of the protocol are agents of route nodes, satellites Sat^i , $i = 1, \dots, k$. The purpose of the protocol is to check the non-intersection condition of the route and add new data to the routing tables at the route nodes.
3. The result of executing the route validation protocol can be the approval or rejection of the

route. If the route is approved, it send the message *Transmission is possible* to the remote sensing satellite agent. If the route is rejected, it learns about the unavailability of the communication channel in the node of the rejected route, updates the state of this channel in its *Network load* database, and, considering this, searches for another route.

The number of nodes in the route determines the number of participants in the route validation protocol. Fig. 7 shows an example of the scheme of this protocol in the special case when the route passes through 3 nodes.

According to the scheme, the *Request* message with the description of the found *Route* is transmitted sequentially to the satellite agents Sat^i , $i = 1, \dots, k$. From the *Route* description, the Sat^i satellite agent identifies the $Sat^i - Sat^{i+1}$ communication channel, and determines its current state based on data from its routing table. If this channel is not used for transmitting another stream, it updates data in its routing table, and passes the *Request* message to the agent of the next route node.

If the *Request* message reaches the terminal node, the route is assumed to be approved, and the terminal node agent initiates the broadcast of the *Inform* message on the network with the description of the approved route. The purpose of distributing the *Inform* message is to update the data in the *Network load* databases of all communication satellites. When the Sat^0 satellite agent receives *Inform* message it also sends the *Transmission is possible* message to the remote sensing satellite agent and the data stream transmission begins.

If the $Sat^i - Sat^{i+1}$ communication channel is already used to relay another data stream, the Sat^i satellite agent initiates the rejection of the found route. Route rejection is reduced to the sequential transmission of the *Cancel* message in the opposite direction along the route path (Fig. 7). In this message, along with the description of the rejected route, the $Sat^i - Sat^{i+1}$ communication channel is transmitted. When this message is received, the node agents update the current data in their *Network load* databases and in their routing tables, and the Sat^0 satellite agent also initiates the process of finding and validating a new route.

It should be noted that the Sat^0 satellite agent learns about the use of the $Sat^i - Sat^{i+1}$ communication channel in another route also from the *Inform* message, which is dis-

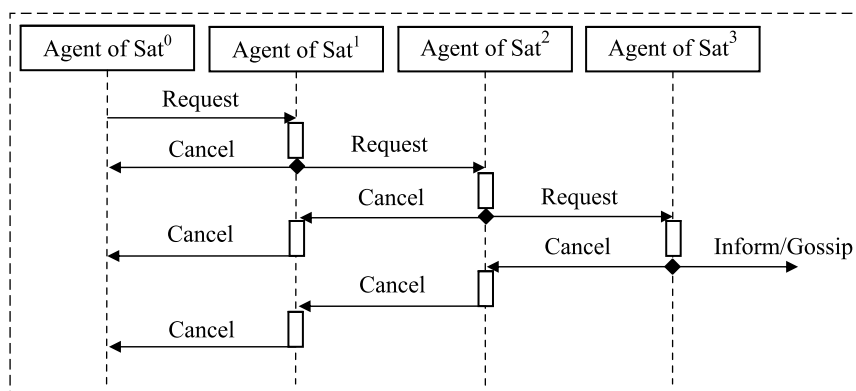


Fig. 7. Protocol of route validation

tributed over the network after the validation of this route. In this case, there are two possible situations: the *Cancel* message is received before or after the arrival of the *Inform* message.

In the first situation, two strategies can be considered. The search and validation of a new route can be performed immediately after receiving the *Cancel* message or with a minor delay after receiving the *Inform* message. The difference between the strategies is as follows. In the first case, the new current data on the use of communication channels in another already approved route is partially known, and in the second case — completely.

In the case of distributed routing, the Sat^0 satellite agent, along with route search and validation also notifies the agents of all communication satellites of the end of route use. In this regard, when it exits the *Data Transmission* state when any of the events 5, 6 or 7 occur (Fig. 5), it initiates the broadcast transmission over the network of the *Inform* message with a description of the route and an indication of the end of its use.

5. Routing in cases of network topology changes

The information interaction schemes of communication satellite agents described in sections 3 and 4 assume that all inter-satellite communication channels are always in operation and the network topology formed by the communication satellites remains constant over time. This section discusses additional tasks of information interaction in cases when some inter-satellite channels fail.

Monitoring of the state of inter-satellite channels can be performed based on the exchange of *Hello* service messages, similar to how it is implemented, for example, in the *OSPF* protocol, which is widely used in practice. A satellite agent that detects a failure of a communication channel transmits a message over the network in broadcast mode with a list of such communication channels.

The behavior model of the Sat^0 satellite agent, when receiving such a message, is as follows. If the channels specified in the message are used in the data transfer route, then it sends a message to the agents of the route nodes about the destruction of the route and initiates the process of searching for a new route in accordance with the interaction schemes described in sections 3 and 4. Route destruction messages are sent for updating the routing tables in the nodes of this route.

The article discusses the routing strategy, according to which data transmission does not involve data congestion in intermediate nodes of the route. In this sense, cases where some communication channel in the route fails can be considered as exceptional ones. A data congestion inevitably occurs at a route node when its communication channel with the next route node fails. In this case, the volume of accumulated data is determined by the length of time that passes after the time when the communication channel fails until the time when the data transmission from the remote sensing satellite is interrupted.

The prototype of the behavior model of the communication satellite agent in this case can be considered the behavior model of the satellite agents Sat^0 (Fig. 5). The difference in the behavior model in this case is only that the source node, from which the data is transmitted, instead of the remote sensing satellite, is the communication satellite itself. At that, the search for a route for data transmission can be performed in accordance with the interaction schemes discussed in section 4.

Conclusion

The object of research in the article is a multi-satellite space system, in which a grouping of communication satellites provides the retranslation of data from remote sensing satellites to ground infrastructure objects. A routing method is proposed that provides data traffic balancing and does not imply the occurrence of data congestion in the network nodes. The software implementation of the proposed routing method is considered as the main component of a complex simulation model designed to study the capabilities of promising multi-satellite space systems.

References

1. Marcuccio S., Ullo S., Carminati M., Kanoun O. Smaller Satellites, Larger Constellations: Trends and Design Issues for Earth Observation Systems, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(10), pp. 50–59, DOI: 10.1109/maes.2019.2928612.
2. Betanov V., Volkov S., Danilin N., Potyupkin A., Selivanov A., Timofeev U. Problematic issues of creating multi-satellite orbital groupings based on small-size spacecraft, *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 57–65, DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.3.57.65 (in Russian).
3. Radhakrishnan R., Edmonson W., Afghah F., Rodriguez-Osorio R., Pinto F., Burleigh S. Survey of Inter-satellite Communication for Small Satellite Systems: Physical Layer to Network Layer View, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, iss. 4, DOI: 10.1109/COMST.2016.2564990.
4. Radhakrishnan R., Zeng Q., Edmonson W. Inter-satellite Communications for Small Satellite Systems, *Inter2013, national*

Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 11–24, DOI: 10.4018/jitn.2013070102.

5. **Ekici E., Akyildiz I., Bender M.** Network layer integration of terrestrial and satellite IP networks over BGP-S", *Global Telecommunications Conference, 2001, GLOBECOM '01*. IEEE, 2002, vol. 4, pp. 2698–2702, DOI: 10.1109/GLOCOM.2001.966264.

6. **Akyildiz I., Ekici E., Yue G.** A Distributed Multicast Routing Scheme for Multi-Layered Satellite IP Networks, *Wireless Networks*, 2003, vol. 9, no. 5, pp. 535–544, DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024648402306>.

7. **Bergamo M.** High-Throughput Distributed Spacecraft Network: architecture and multiple access Technologies, *Computer Networks*, 2005, vol. 7, no. 5, pp. 725–749.

8. **Rajanna M., Kantharaju H., Shiva M.** Satellite Networks Routing Protocol Issues and Challenges: A Survey, *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 153–157.

9. **Zhang D.-Y., Liu S., Yin M.** A Satellite Routing Algorithm Based on Optimization of Both Delay and Bandwidth, *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2011, pp. 1–4, DOI: 10.1109/wicom.2011.6040248.

10. **Li D., Mao X., Yu J., Wang G.** A Destruction Resistant Dynamic Routing Algorithm for LEO/MEO Satellite Networks, *The Fourth International Conference on Computer and Information Technology*, CIT '04., 2004, pp. 522–527, DOI: 10.1109/CIT.2004.1357248.

11. **Yang D.-N., Liao W.** On Multicast Routing Using Rectilinear Steiner Trees for LEO Satellite Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, vol. 57, no. 4, pp. 2560–2569, DOI: 10.1109/TVT.2007.912605.

12. **Zihe G., Qing Q., Zhenyu N.** A Distributed Multipath Routing Strategy for LEO Satellite Networks, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2011, vol. 14, no. 2, pp. 161–169.

13. **Di D., Qing L.** A New Routing Algorithm of Two-tier LEO/MEO Mobile Satellite Communication Systems, *Asia-Pacific Conference on Communications*, 2005, pp. 111–115, DOI: 10.1109/APCC.2005.1554029.

14. **Silva A., Burleigh S., Obraczka K. (Editors)** Delay and Disruption Tolerant Networks, Interplanetary and Earth-Bound Architecture, Protocols, and Applications, 2018, 486 p., DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315271156>.

15. **Bezirgiannidis N., Caini C., Montenero D., Ruggieri M., Thaoussidis V.** Contact graph routing enhancements for delay tolerant space communications, *Proceedings of the 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop*, 2014, pp. 17–23, DOI: 10.1109/ASMS-SPSC.2014.6934518.

16. **Madoery P., Fraire J., Finochietto J.** Congestion management techniques for disruption-tolerant satellite networks, *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 165–178.

17. **Marchese M., Patrone F.** A source routing algorithm based on CGR for DTN-nanosatellite networks, *Global Communications Conference*, IEEE, 2017, DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8255092.

18. **Fraire J., Finochietto J.** Design Challenges in Contact Plans for Disruption-Tolerant Satellite Networks, *IEEE Communications Magazine*, May 2015, vol. 53, pp. 163–169, DOI: 10.1109/MCOM.2015.7105656.

19. **Fraire J.** Introducing Contact Plan Designer: A Planning Tool for DTN-Based Space-Terrestrial Networks, *6th International Conference on Space Mission Challenge for Information Technology*, 2017, pp. 124–127, DOI: 10.1109/SMC-IT.2017.28.

20. **Madoery P., Fraire J., Raverta F., Burleigh S.** Managing Routing Scalability in Space DTNs, *6th IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments*, 2018, DOI: 10.1109/WiSEE.2018.8637324.

21. **Fraire J., Madoery P., Burleigh S., Feldmann S., Finochietto S., Charif A., Zergainoh N., Velazco R.** Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations, *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2017, Article ID 2830542, 18 p., DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2830542>.

22. **Fraire J., De Jonckère O., Burleigh S.** Routing in the Space Internet: A contact graph routing tutorial, *Journal of Network and Computer Applications*, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102884>.

23. **Makarenko S.** Descriptive Model of Iridium Satellite Communication System, *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 1–34, URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf> (in Russian).

24. **Dijkstra E.** A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.



**31 мая – 21 июня 2022 г. в Санкт-Петербурге
на базе ОАО "Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»
состоится**



XXVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru

А. М. Агеев, канд. техн. наук, доц., ageev_bbc@mail.ru,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных Сил "Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж

Принципы хранения и мониторинга информации о конфигурациях в задаче управления избыточностью комплекса бортового оборудования

Предложены принципы формирования основных структурных компонентов для реализации задачи управления избыточными ресурсами комплекса бортового оборудования (КБО): таблиц конфигураций, индексов готовности и показателей функциональной эффективности программных и аппаратных компонентов оборудования, позволяющие формализовать процессы их разработки и использования в задаче управления избыточными ресурсами КБО. Предложено разделение избыточных компонентов на группы ресурсов: вычислительные модули, компоненты ядра операционной системы, компоненты бортового программного обеспечения, компоненты периферийной коммутационной системы, аппаратные периферийные компоненты КБО. Сформулированы общие принципы организации мониторинга избыточных ресурсов, позволяющие использовать схемы и возможности как традиционных встроенных средств контроля (нижний уровень мониторинга), так и более развитых алгоритмических решений на основе логической обработки результатов контроля (средний и верхний уровни мониторинга). Предложены механизмы формирования, а также формы таблиц конфигураций для аппаратных компонентов и бортовых приложений, а также правила их заполнения, ориентированные на использование в супервизорах конфигураций. Разработаны и детализированы принципы формирования индексов готовности и показателей функциональной эффективности, позволяющие реализовать в программной среде учет различных факторов, определяющих возможности и эффективность различных вычислительных средств и конфигураций КБО. Предложен способ коррекции показателей функциональной эффективности конфигураций за счет формирования режимов, адаптирующего реконфигурирование комплекса к условиям его использования, решаемым задачам, командам оператора. Приведен пример учета разнообразия задач и режимов КБО воздушного судна: этапов полета, аварийных ситуаций, сервисных услуг и поддержки, режимов жизнеобеспечения, работы пилотажно-навигационного комплекса, а также управляющих команд экипажа. Предложенные решения могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования комплексов оборудования, систем безопасности полетов, управления общесамолетным оборудованием, программно-управляемых систем радиосвязного оборудования, многоспектральных бортовых систем разведки, целеуказания и управления авиационным вооружением и специальными целевыми нагрузками перспективных авиационных комплексов.

Ключевые слова: комплекс бортового оборудования, управление избыточностью, мониторинг состояния, таблица конфигурации, индекс готовности, показатель функциональной эффективности

Введение

В настоящее время в области построения авионики осуществился переход от централизованных и федеративных к распределенным интегрированным комплексам бортового оборудования (КБО) [1—3]. В качестве примеров распределенных интегрированных КБО можно указать пассажирские самолеты Airbus A-380, SSJ-100, боевые самолеты F-35 и Су-57. Ведется разработка отечественных перспективных авиационных комплексов Ил-114 New, SSJ-75 и др. Тенденции современного развития бортового оборудования воздушных судов связаны с концепцией интегрированной модульной авионики (ИМА) [4—6]. В качестве кардинального пути снижения времени, упрощения технологии и снижения стоимости обслуживания воздушных судов (ВС), включая их бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО), рассматривается реализация концепции авионики необслуживаемого бортового оборудования

(АНБО) [7, 8], которая созвучна с концепцией интегрированного управления исправностью транспортного средства (Integrated Vehicle Health Management — IVHM) [9, 10] и подразумевает бортовое оборудование, созданное с возможностью автоматического самовосстановления в заданный межрегламентный период функционирования без участия персонала.

Одним из принципов построения современных и перспективных КБО ВС является их избыточность (англ. redundancy) как на системных уровнях сетевых связей, каналов передачи данных, вычислительных систем, так и на уровне отдельных модулей, узлов, компонентов [11]. Под избыточностью технической системы понимается наличие в ней возможностей (аппаратных, вычислительных, энергетических и т. д.) сверх тех, которые могли бы обеспечить ее нормальное функционирование [12]. В АНБО избыточность является неперенным свойством для реализации возможности автоматического восстановления (различными техническими средствами)

отказавших функций комплекса. Кроме того, за счет так называемой функциональной избыточности возможно достижение других, принципиально новых качеств комплекса (многофункциональности, адаптации к внешним условиям, решаемой задаче и др.).

Постановка задачи

В работах [13—17] последовательно развиваются теоретические аспекты *теории управления избыточностью* комплексов оборудования на основе супервизорного подхода. В статье [13] вводится понятие *супервизора конфигурации*, под которым понимается аппаратный или программный модуль, на который возлагается формирование, хранение, обновление и при необходимости использование информации о каждой конкурентоспособной конфигурации КБО. В работах [14—16] обосновываются основные теоретические положения формализации задач формирования конфигураций и конфигурирования избыточных ресурсов. Статья [17] посвящена практической адаптации подхода к решению задач управления вычислительной системой КБО.

В указанных работах сформирована систематизированная совокупность понятий, методик и структур бортовой системы управления избыточностью, которые оформились в *супервизорный способ управления избыточностью* как

способ обработки данных об альтернативных конфигурациях, включающий сбор данных, подготовку и проведение арбитража претендентов на предпочтение с последующей реализацией выбранного победителя (вычислителя или конфигурации). Обоснована структура и сформулированы основные положения о *системе управления избыточностью* (СУИ) КБО, упрощенная структурная схема которой представлена на рис. 1.

Предложенная система предполагает наличие множеств резервированных избыточных компонентов КБО со встроенными средствами контроля (ВСК), вычислителей и коммутационных средств и опирается на множество супервизоров конфигураций (СК), каждый из которых включает: таблицы конфигураций, таблицы показателей функциональной эффективности, буфер индексов готовности, модуль мониторинга, формирователь режимов, алгоритмы арбитража супервизоров, управляющий модуль, а также вспомогательные процедуры и буферные файлы. На рис. 1 ДСК — доминирующий СК — победитель арбитража, α -вычислитель — вычислитель, в котором реализуется ДСК.

В число важных функций супервизоров входят мониторинг состояния программных и аппаратных компонентов, а также хранение данных о конфигурациях. Настоящая статья направлена на обоснование основных принципов формирования и технической реализации в КБО конфигурационных таблиц, индексов готовности и

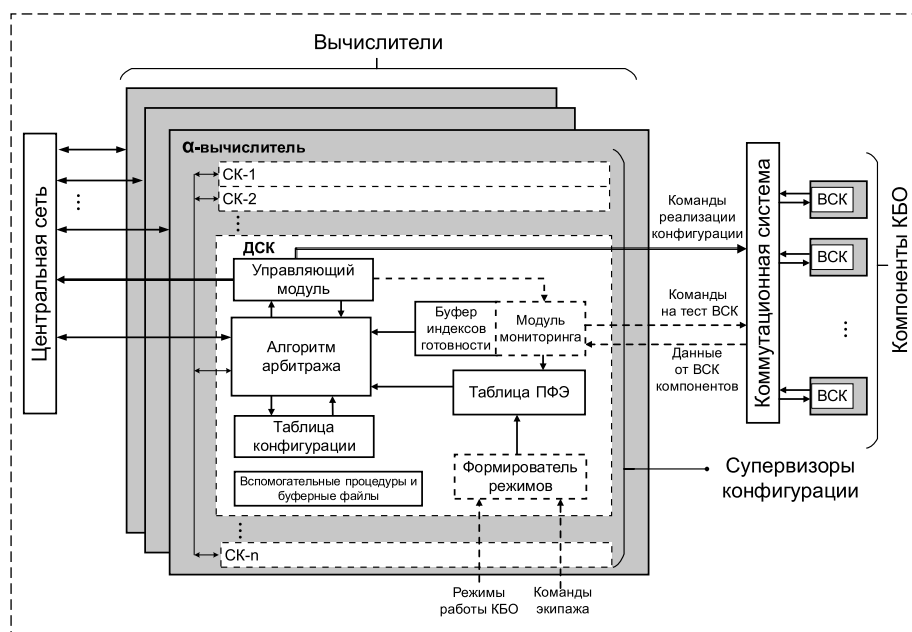


Рис. 1. Система управления избыточностью КБО

Fig. 1. OEC redundancy management system

показателей функциональной эффективности компонентов оборудования, позволяющих формализовать процессы их разработки и использования в задаче управления разнородными ресурсами в рамках супервизорного способа управления избыточностью КБО.

Избыточные ресурсы КБО

Предполагается, что комплекс состоит из набора компонентов, различных по предназначению, физической природе и принципам функционирования, избыточного в том смысле, что никакой из компонентов не обладает исключительностью

или незаменимостью в составе комплекса, при этом предусматривается превышающая единицу кратность резервирования компонентов, выполняющих одинаковые или взаимозаменяемые (полностью или частично, возможно с частичной потерей эффективности) функции.

Под *конфигурацией* избыточной системы (комплекса) понимается специальная, временно сформированная не избыточная работоспособная совокупность компонентов, соответствующая решаемым задачам на текущем этапе полета.

Все ресурсы КБО, участвующие в процессе управления избыточностью — *избыточные ресурсы* — делятся на несколько групп, число которых определяется разработчиком КБО в зависимости от задач управления, а также оценки возможности и целесообразности управления их реконфигурацией.

В задачах управления ресурсами КБО авиационных комплексов в простейшем случае могут выделяться следующие группы: вычислительные модули (ВМ), компоненты бортового функционального программного обеспечения (ФПО), компоненты периферийной коммутационной системы (ПКС), аппаратные периферийные компоненты КБО (КОМ)¹.

Формирование и хранение конфигурационных данных

Согласно работе [1] *таблицы конфигурации* — это специально организованные струк-

б) связей между компонентами программных ресурсов (наличие или отсутствие передачи целевой информации между приложениями);

в) распределения функциональных приложений между вычислителями, которое в общем случае можно также рассматривать как связь между компонентами: аппаратными (вычислителями) и программными (запускаемыми в них приложениями).

В целях определения правил формирования конфигурационных таблиц приведем формализованное описание элементов хранения данных о конфигурациях, основные понятия о которых приведены в работах [13—17].

Будем полагать, что КБО содержит множество $\mathfrak{R}$ компонентов, общее число входов и выходов которых составляют множества $\mathfrak{R}_{\text{вх}}$ и $\mathfrak{R}_{\text{вых}}$ соответственно. Пусть общее число различных рассматриваемых конфигураций КБО составляет n . Каждая из конфигураций содержит подмножество соотнесенных с ней компонентов $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}$, общее число которых обозначим k , а общее число их входов и выходов $k_{\text{вх}} \in \mathfrak{R}_{\text{вх}}$ и $k_{\text{вых}} \in \mathfrak{R}_{\text{вых}}$ соответственно.

Тогда в общем случае будут иметь место n конфигурационных таблиц (по числу конфигураций), каждая i -я из которых в своем "ядре", т. е. без учета дополнительных строк и столбцов, будет содержать k столбцов и 2 строки: ячейки верхней строки таблицы содержат номера компонентов η , с которыми связаны входы данного компонента, а нижней — номера компонентов ρ , с которыми связаны выходы данного компонента:

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\text{вх}} \\ \mathbf{K}_{\text{вых}} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \text{комп. 1} & \text{комп. 2} & \dots & \text{комп. } k \\ \hline [\eta_{11} \ \eta_{12} \ \dots \ \eta_{1n}] & [\eta_{21} \ \eta_{22} \ \dots \ \eta_{2m}] & \dots & [\eta_{N1} \ \eta_{N2} \ \dots \ \eta_{Nq}] \\ \hline [\rho_{11} \ \rho_{12} \ \dots \ \rho_{1k}] & [\rho_{11} \ \rho_{12} \ \dots \ \rho_{1l}] & \dots & [\rho_{N1} \ \rho_{N2} \ \dots \ \rho_{Np}] \end{array} \right]$$

– номера входов

– номера выходов.

туры данных, которые формируются на этапе разработки и хранят информацию о соотнесенной с супервизором конфигурации в виде:

а) связей между компонентами аппаратных ресурсов (наличие или отсутствие соединения их входов и выходов);

При этом клетки таблицы, соответствующие отсутствию связей между компонентами, заполняются нулями. Например, запись

$$\mathbf{K}_7 = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} 2, 3, 5 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 3 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right] \tag{2}$$

1
2
3
4
5
— номера компонентов

означает, что конфигурация № 7 содержит 5 компонентов, вход компонента № 1 соединен с выходами компонентов № № 2, 3 и 5, причем компоненты № 1 и № 3 имеют двунаправленную связь.

¹Далее принятые аббревиатуры будем использовать для обозначения в таблицах, относящихся к той или иной группе ресурсов.

Как описано в работе [15], таблицы конфигураций могут храниться в форме матриц связей вида (для приведенного выше примера): раздельно для кодирования связей по входам

$$C_{7_{\text{вх}}} = \left\{ K_{\text{вх}} [2, 3, 5 | 0 | 1 | 0 | 0] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1^{\wedge} & 0 & 0 \\ 1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\wedge} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

и по выходам

$$C_{7_{\text{вых}}} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1^{\triangleright} & 0 & 0 \\ 1^{\triangleright} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\triangleright} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^{\triangleright} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} K_{\text{вых}} \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

или в обобщенном виде

$$C_7^* = \left\{ K_{\text{вх}} [2, 3, 5 | 0 | 1 | 0 | 0] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1^* & 0 & 0 \\ 1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1^* & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} K_{\text{вых}} \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}, \quad (5)$$

где знаками $1^{\wedge}$ отмечены связи по входам; $1^{\triangleright}$ — связи по выходам; 1^* — двунаправленные связи между компонентами. Единицы в матрицах связей указывают на наличие связей, нули — на их отсутствие. Число единиц в одном столбце или строке, таким образом, соответствует числу активных (задействованных для коммутации) входов или выходов компонентов. Диагональ матрицы остается незадействованной, либо может использоваться для хранения дополнительной информации о компонентах (готовности и т. д.).

Для перехода от записи таблицы (1) к (3) и (4) требуется "разнести" векторы индексов верхней и нижней строк матрицы K по соответствующим строкам и столбцам матриц связей $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вых}}$.

Для осуществления обратного перехода необходимо:

- номера строк всех единичных ($1^{\wedge}$) элементов матрицы $C_{\text{вх}}$ снести в одну дополнительную строку;

Таблица конфигурации (коммутация компонентов)
Configuration table (component commutation)

Взаимосвязи компонентов	№ компонентов						
	1	2	3	4	5	...	k
На входе	2, 3, 5 [↓]		1				
На выходе	3 [↖]	1	1		1		

- номера строк всех единичных ($1^{\triangleright}$) элементов матрицы $C_{\text{вых}}$ снести в один дополнительный столбец;
 - номера строк и столбцов всех единичных (1^*) элементов матрицы C^* добавить одновременно в указанные дополнительные строку и столбец.
- Таким образом, конструкции (3), (4) и (5) обеспечивают однозначную связь с интерфейсными и конфигурационными матрицами из работ [14–16] по формализации задачи управления избыточностью и генерированию альтернативных конфигураций комплекса оборудования.

На практике ячейки таблиц конфигураций предлагается формировать следующим образом. Информация о каждой конфигурации КБО хранится в форме электронных таблиц вида, представленного в табл. 1. Каждая строка разбита на две подстроки. Для каждого компонента k_j в верхней подстроке указываются порядковые номера компонентов, соединенных своими выходами с входом k_j (от каких компонентов идет информация на k_j), в нижней подстроке — номера компонентов, соединенных своими входами с выходом k_j (каким компонентам идет информация с k_j). Если вход или выход компонента не используется, ставится "0". Наполнение табл. 1 соответствует примеру, приведенному в выражении (2), стрелками показаны направления соответствующих связей.

Аналогичным образом формируются таблицы конфигураций программных компонентов: таблица формируется путем указания номеров приложений f_{ij} в ячейках для входов содержащих их вычислителей, а также указания номеров вычислителей v_{ij} в ячейках для входов ФПО:

$$K_i = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c} \text{ВМ. 1} & \text{ВМ. 2} & \dots & \text{ФПО.1} & \text{ФПО.2} & \dots \\ \hline [f_{11} & f_{1n}] & [f_{21} & f_{2n}] & \dots & [v_{11} & v_{1m}] & [v_{21} & v_{2m}] & \dots \\ \hline \end{array} \right] \begin{array}{c} \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{вычислители}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{приложения}} \end{array}$$

Таблица конфигурации (распределение приложений)
Configuration table (application distribution)

	Вычислители					Приложения			
№ компонентов	1	2	3	4	5	6	7	8	...
Обозначения	ВМ-1	ВМ-2	ВМ-3	ВМ-4	ВМ-5	ФПО-1	ФПО-2	ФПО-3	...
Взаимосвязи						2	3		...
		6	7						...

Таблица 3
Table 3Обобщенная конфигурационная таблица КБО
Summary OEC configuration table

	Вычислители					Приложения					Компоненты				
№ компонентов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Обозначение	ВМ-1	ВМ-2	ВМ-3	ВМ-4	...	ФПО-1	ФПО-2	ФПО-3	ФПО-4	...	К-1	К-2	К-3	К-4	...
Взаимосвязи	11			13	...	2	1, 3		4	...		4			...
	7	6	7	12	...					...	1		4		...

В примере (в табл. 2) показано, что в конфигурации № 1 во втором вычислителе задействованы (инициализированы и выполняют свою штатную функцию) ФПО-1, а в третьем вычислителе — ФПО-2.

Формирование таблиц ведется поэтапно, от низшего уровня к высшему. На первом этапе заполняются ячейки, соответствующие компонентам в составе подсистем, далее заполняются связи внутри систем и групп компонентов, после этого — связи между всеми компонентами, входящими в КБО, до получения единой многосвязной таблицы конфигураций КБО (табл. 3).

Процесс разработки конфигурационных таблиц может быть автоматизирован с использованием методов и соответствующих систем автоматизированного проектирования и интеграции КБО.

Организация мониторинга ресурсов

Цель мониторинга избыточных ресурсов КБО — формирование индекса готовности (ИГ) каждого компонента комплекса для обеспечения всех СК первичными данными в интересах управления избыточностью. Перечень данных, охватываемых мониторингом,

в зависимости от физической природы и конструктивных особенностей компонентов может включать бинарные оценки (1 — соответствие требованиям, 0 — в противном случае):

- работоспособности (подтвержденное ранее надлежащее выполнение основной функции, отсутствие или приемлемая частота сбоев);
- удовлетворительных результатов самодиагностики (при наличии);
- наличия и правильной работы необходимого обеспечения (электропитание, охлаждение, ресурсы памяти и процессорное время и т. п.);
- доступности для коммуникации (наличие электрической связи, готовность к работе буферов и пр.);
- завершения установки и запуска программ (при наличии);
- завершения загрузки и распаковки необходимых для работы массивов библиотечных данных (при наличии) и др.

Мониторинг выполняется в три основных шага:

- а) сбор данных от компонентов путем инициализации данных специальными запросами, либо в режиме перехвата трансляции, организованной компонентами самостоятельно;

б) обработка данных, включая логическое объединение, а также подготовку результата к передаче;

в) передачу результата в виде ИГ по запросам СК или путем транслирования в сеть.

Мониторинг избыточных ресурсов предполагается трехуровневым¹.

Нижний уровень базируется исключительно на существующих или вновь создаваемых ВСК компонентов [18], не выходя за их рамки. В зависимости от реализации может выполняться в процессе функционирования компонента и/или в режиме его "дежурства".

Средний уровень базируется на тех же ВСК, но с реализацией процедур логического парного мониторинга (ЛПМ) [19] резервированных компонентов, что при неоднородности² ВСК позволяет создать эффект достоверного контроля работы функциональной части компонентов и достоверного контроля работы самих ВСК.

Верхний уровень не зависит от ВСК и базируется на использовании технологии направленных триплексных графов (НТГ) [20], что обеспечивает качественно новый уровень контроля безотказности функционирования КБО.

Процедуры мониторинга выполняются *модулем мониторинга*, входящим в состав каждого СК. Возможны варианты реализации КБО с вынесением отдельных функций мониторинга за пределы СК в виде отдельных модулей мониторинга, что особенно актуально для сложных и требовательных к вычислительным затратам алгоритмов среднего и высокого уровней мониторинга.

Принципы формирования индексов готовности

Независимо от выбранного способа мониторинга избыточных ресурсов результат их работы представляется в виде, необходимом для формирования по следующим правилам.

¹Алгоритмы реализации каждого из уровней мониторинга в данной статье не рассматриваются.

²ВСК одинакового предназначения созданы различными разработчиками и/или на основе различных технических решений.

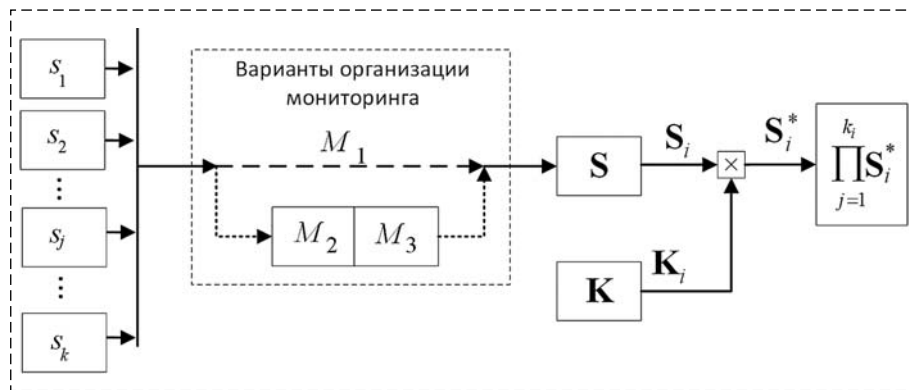


Рис. 2. Схема формирования интегрального индекса готовности конфигурации
Fig. 2. Configuration Integral Available Index formation scheme

Индекс готовности характеризует работоспособность компонента КБО и может принимать значения: "1", если компонент исправен и готов к использованию на следующем цикле работы системы; "0", если компонент не исправен и/или не готов.

Пусть в КБО предусмотрены n конфигураций. Компоненты конкретной i -й конфигурации, где $i = \overline{1, n}$, имеют порядковые номера $j = \overline{1, k}$, где k — число компонентов в i -й конфигурации. В соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2, компоненты конфигурации через ВСК формируют для модуля мониторинга частные индексы готовности компонентов s_j . На рис. 2 M_1, M_2, M_3 — это функции алгоритмов мониторинга соответствующих уровней.

Алгоритмы мониторинга F_m (только по данным ВСК — случай M_1 , либо путем многоуровневой дополнительной обработки результатов тестов ВСК — случаи M_2 и M_3) формируют буфер индексов готовности (БИГ) i -й конфигурации $S_i = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_j \ \dots \ s_n]$.

Для готовности супервизора необходима готовность всех компонентов подконтрольной ему конфигурации K_i , т. е. интегральный индекс готовности (ИИГ) i -го СК будет определяться логическим произведением ИГ всех компонентов, входящих в конфигурацию:

$$\prod_{j=1}^{k_i} S_i^* = \prod_{j=1}^{k_i} F_m(K_i \times S_i) = K_i \times F_m \prod_{j=1}^{k_i} s_j. \quad (6)$$

Формирование ИГ реализуется следующим образом. При инициализации работы комплекса управляющий модуль СК (если модуль мониторинга входит в его состав) или модуль СПО УИ (если мониторинг не входит в состав СК) формирует соответствующий сигнал на запуск процедур тестирования соотнесенного с ним оборудования и/или программ-

Таблица 4
Table 4

Буфер индексов готовности
Availability index buffer

№ компонентов	1	2	3	4	...	k
ИГ	1	1	0	1	...	1

ных средств. Вычислители через драйверы устройств с заданным тактом проводят опрос всего подключенного оборудования и периферии, получают от них информацию о работоспособности и формируют БИГ компонентов конфигурации в виде, показанном в табл. 4.

Формирование ИГ программных средств происходит аналогичным образом: средство мониторинга состояния ядра ОСРВ проводит опрос всех программных модулей ФПО, получая от них информацию о работоспособности, и формирует индекс готовности ФПО.

На основе ИГ компонентов СК, составляющих БИГ, формируется ИИГ конфигурации, определяемый в самом простом случае как конъюнкция ИГ всех компонентов, входящих в конфигурацию. ИИГ СК характеризуют текущее состояние готовности соотнесенных с СК конфигураций на каждом цикле работы СУИ и используются в процедуре арбитража СК.

Принципы формирования показателей функциональной эффективности

Под *показателями функциональной эффективности* (ПФЭ) [13] понимаются показатели, интегрально характеризующие уровень возможно достижимых эксплуатационно-технических характеристик компонентов. ПФЭ содержат в численном виде информацию об эффективности соответствующих ресурсов КБО для данного режима работы. Значения или правила оперативного вычисления ПФЭ назначаются на этапе разработки КБО исходя из логики работы комплекса и характеризуют группу тех или иных компонентов по каким-либо отличительным признакам (характеристикам). Разработчиком КБО методом сравнения ПФЭ отдельных компонентов (их наборов) между собой формируются "конкурсные" списки, определяющие приоритет использования соответствующих компонентов и систем в зависимости от режима работы и/или состояния КБО, а также определяются правила выбора

данных из "конкурсных" списков в процессе функционирования КБО.

Содержание и формы ПФЭ зависят от типа и принципа действия компонентов. В общем случае можно выделить:

1) целевые ПФЭ, формализующие осуществимость и уровень выполнения задач КБО по предназначению (точность, оптимальность, ресурсоемкость, наличие ресурсов для повторного использования, эргономичность, эффективность управления и др.);

2) эксплуатационные ПФЭ, отражающие надежно-стоимостные характеристики (показатели надежности выполнения задач, актуальные уровни физического, программного и функционального резервирования, остаток ресурса, сохраняемость и/или восстанавливаемость компонентов и их частей);

3) вычислительно-временные ПФЭ, отражающие уровень рационализации выполнения задач с позиции использования вычислительных и коммуникационных процессов (операционное время, объемы данных и резервируемой памяти, битрейты каналов связи и др.).

Хорошим подспорьем для реализации фиксирования и хранения различных ПФЭ является идеология систем объективного контроля функциональных элементов (СОК ФЭ), выполненных на встраиваемых в устройства (датчик, вычислитель, актюатор и пр.) чипах [21].

С формальной точки зрения заданный ПФЭ i -й конфигурации — это заранее определенная таблица вида $P_i = [p_1 p_2 \dots p_j \dots p_k]$, хранящая ПФЭ отдельных компонентов p_j , входящих в состав конфигурации.

Показатели функциональной эффективности хранятся в каждом супервизоре в специальных *таблицах ПФЭ* вида, показанного в табл. 5.

Столбцы таблицы соответствуют компонентам КБО. В ячейки таблицы вносятся ПФЭ компонентов в физических или нормированных величинах.

Таблицы ПФЭ формируются на этапе проектирования СУИ и по аналогии с таблицами конфигурации на первых этапах могут быть

Таблица 5
Table 5

Таблица показателей функциональной эффективности
Table of functional efficiency indicators

№ компонентов	1	2	3	4	...	k
ПФЭ	0,1	2,2	12	4,1	...	...

Обобщенная таблица ПФЭ
Summary table of FEI

	Группы												
	Вычислители				ФПО				Компоненты КБО				КБО
№ компонентов	1	2	...	$k_{\text{в}}$	1	2	...	$k_{\text{ф}}$	1	2	...	$k_{\text{к}}$	ИПФЭ
ПФЭ	4	3	...	1	1	2	...	6	0,1	2,2	...	12	1,57

сформированы ПФЭ отдельных групп ресурсов комплекса. Далее возможно формирование ПФЭ по группам компонентов, имеющих однотипные показатели. После этого составляются обобщенные таблицы ПФЭ всей конфигурации, а также вычисляются интегральные ПФЭ (ИПФЭ) путем использования выбранного метода суммирования или усреднения в соответствии, например, с табл. 6.

Механизм определения ИПФЭ (на примере КБО самолета транспортной категории) более подробно описан в следующем разделе.

Формирователь режимов КБО

В целях адаптации СУИ к режимам работы и внешним командам в процессе работы КБО проводится оценка следующих факторов:

- этапы полета воздушного судна (запуск, руление, взлет, набор высоты, полет по маршруту, снижение, посадка и т. д.);
- сервисные режимы работы воздушного судна (предполетная проверка, опробование двигателя, заправка топливом и специальными жидкостями, автоматизированный сервисный контроль и т. д.);
- аварийные режимы работы оборудования (пожар, повреждение или останов двигателей, отказ систем и агрегатов и т. д.);

- установленные режимы критичности состояний воздушного судна (штатный, отказный, аварийный, катастрофический);
- режимы работы отдельных комплексов и систем КБО (от наиболее важных, таких как пилотажно-навигационный комплекс (ПНК), система жизнеобеспечения и др., до второстепенных, например, услуги и поддержка пассажиров).

Предлагается схема формирования ИПФЭ каждой i -й конфигурации, представленная на рис. 3.

На рис. 3 обозначены:

$P_i = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_j \ \dots \ p_k]$ — заданные ПФЭ конфигурации, т. е. заранее определенная таблица ПФЭ конфигурации, хранящая ПФЭ отдельных компонентов p_j , входящих в ее состав;

$P_i^* = [p_1^* \ p_2^* \ \dots \ p_j^* \ \dots \ p_k^*]$ — текущие ПФЭ конфигурации (таблица ПФЭ конфигурации с учетом состояния готовности ее компонентов и режимов работы КБО);

$F_a = f(R_1, \dots, R_M) = f(R_m)$ — функция формирования *индекса режима* (алгоритм приоритета режимов), где R_m — параметры, характеризующие текущее состояние режимов работы КБО, $m = \overline{1, M}$, M — число групп режимов КБО (этап полета, режим аварийности, режим работы ПНК и т. д.)¹;

$F_b = f(F_a)$ — функция формирования текущего *буфера приоритета* (выбор одного из наборов формирующих коэффициентов эффективности (ФКЭ) для выбранного режима из таблицы режимов в зависимости от индекса режима F_a);
 $B_r = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_j \ \dots \ b_k]$ — буфер приоритета, хранящий

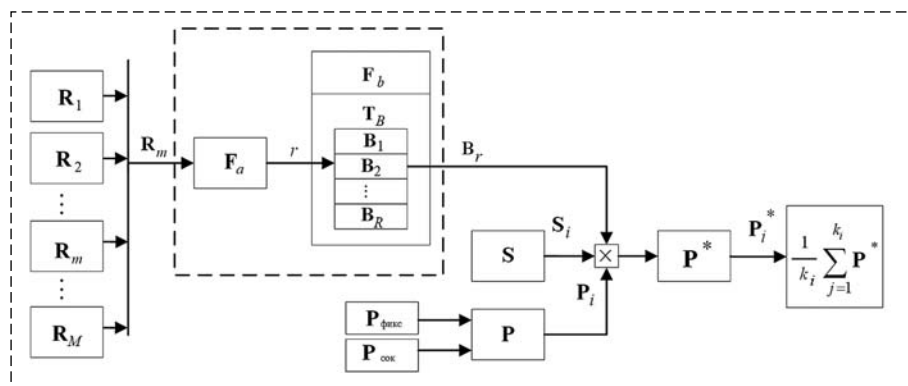


Рис. 3. Схема формирования ИПФЭ, адаптивная к режимам КБО
Fig. 3. The scheme of Integral FEI formation, adaptive to OEC modes

¹Алгоритм формирования функции F_a является самостоятельной задачей и выносится за рамки данной статьи.

информацию о наборе ФКЭ b_j , повышающих, понижающих или обнуляющих текущие ПФЭ компонентов конфигурации, где $r = \overline{1, R}$ — номер режима СУИ в формирователе режимов (номер строки таблицы режимов T_B);

$$T_B = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_R]^T = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{R1} & b_{R2} & \dots & b_{Rk} \end{bmatrix} \quad —$$

таблица режимов, номер r каждой строки которой соответствует индексу режима $r = F_a(R_1, \dots, R_M)$, сформированного алгоритмом приоритета режимов, а каждая строка $B_r = [b_{r1} \ b_{r2} \ \dots \ b_{rk}]$ — буфер приоритета с набором ФКЭ, соответствующих этому режиму.

Таким образом, согласно рис. 3 ИПФЭ i -й конфигурации будет определяться (в самом простом случае) как среднее арифметическое всех ПФЭ компонентов, входящих в таблицу текущих ПФЭ конфигурации с учетом состояния готовности ее компонентов и режимов работы КБО:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} P_i^* &= \frac{1}{k_i} F_b(r) P_i S_i = \\ &= \frac{1}{k_i} F_b [F_a(R_1, \dots, R_M)] P_i S_i. \end{aligned} \tag{7}$$

Выделенную на рис. 3 штриховой рамкой часть схемы назовем формирователем режи-

мов (ФР), который реализуется путем обмена информацией с соответствующими подсистемами и приложениями посредством существующих протоколов и интерфейсов.

Таким образом, в состав формирователя режимов входят:

а) *индекс режима (ИР)*, определяющий порядковый номер обобщенного режима СУИ, представляемый натуральным числом, обозначающий, какой из буферов приоритета выбирается для коррекции ПФЭ;

б) *буфер приоритета (БП)*, который содержит коэффициенты, повышающие (понижающие, обнуляющие) вклад ПФЭ компонентов конфигурации в ИПФЭ;

в) *таблица режимов*, осуществляющая хранение буферов приоритета для всех вариантов режимов СУИ;

г) *алгоритм приоритета режимов (АПР)*, который определяет выбор того или иного БП (набора ФКЭ) в зависимости от режима работы КБО, а также команд экипажа. Результат работы АПР реализуется в виде ИР. АПР формируется на этапе проектирования исходя из логики работы КБО и является самостоятельной задачей разработки СУИ.

Схема, поясняющая процесс работы ФР, представлена на рис. 4. На схеме обозначены подсистемы самолета: СЖО — система жиз-

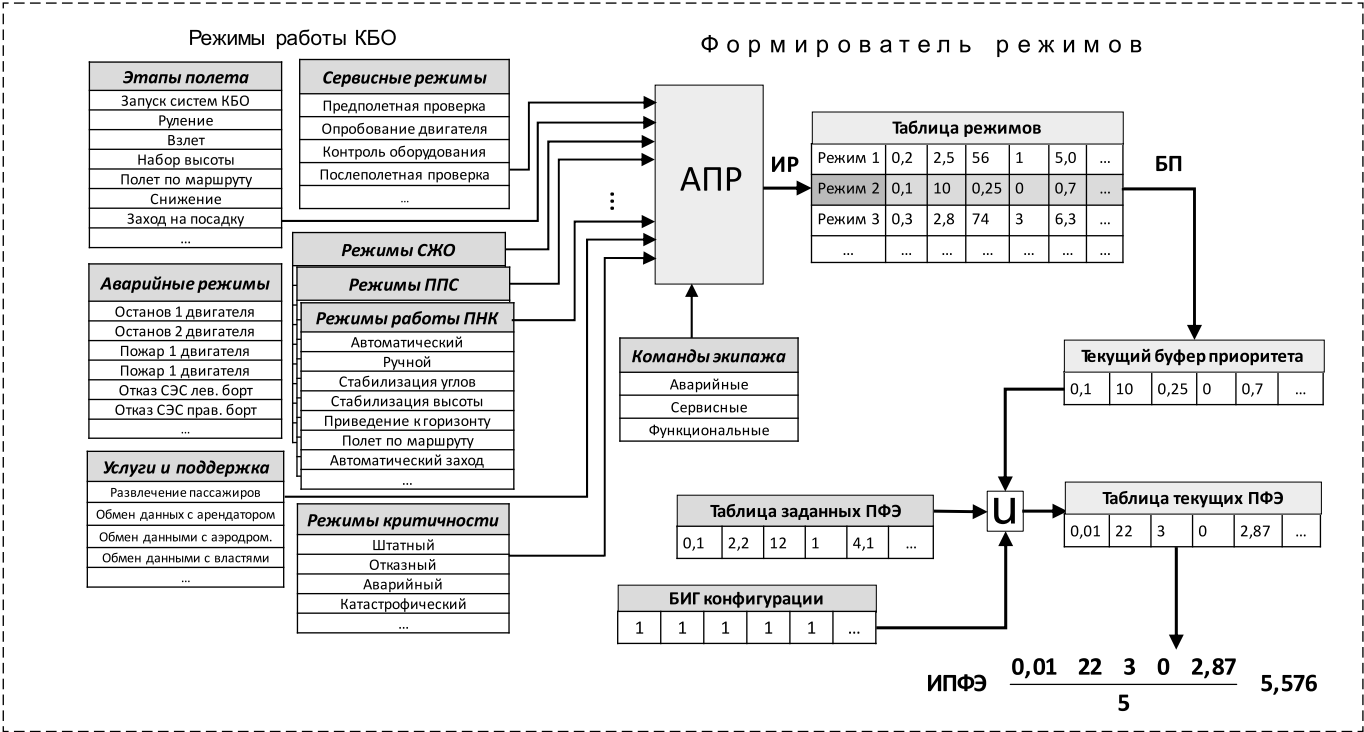


Рис. 4. Пример формирования ИПФЭ, адаптивного к режимам работы КБО самолета

Fig. 4. An example of a FEI formation that is adaptive to the aircraft OEC mode

необеспечения экипажа; ППС — противопожарная система; СЭС — система электроснабжения; ПНК — пилотажно-навигационный комплекс.

Таким образом, в процессе формирования ПФЭ могут учитываться различные условия и режимы работы КБО, приоритеты по группам компонентов, а также индивидуальные текущие ПФЭ отдельных компонентов.

Заключение

В статье предложены формы таблиц конфигураций и правила их заполнения, ориентированные на использование в супервизорах конфигураций. Сформулированы общие принципы организации мониторинга избыточных ресурсов, позволяющие использовать возможности как традиционных встроенных средств контроля, так и более развитых алгоритмических решений. Разработаны и детализированы принципы формирования индексов готовности и показателей функциональной эффективности. Предусмотрен, в частности, механизм учета разнообразия задач и режимов КБО: этапов полета, аварийных ситуаций, сервисных услуг и поддержки, режимов жизнеобеспечения, работы ПНК и пр. Предусмотрен формирователь режимов, адаптирующий реконfigurирование системы к условиям его использования. Предложенные решения могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования комплексов оборудования, систем безопасности полетов, управления общесамолетным оборудованием, программно-управляемых систем радиосвязного оборудования, многоспектральных бортовых систем разведки, целеуказания и управления авиационным вооружением и специальными целевыми нагрузками перспективных авиационных комплексов.

Список литературы

1. Алешин Б. С., Бабкин В. И., Гохберг Л. М. и др. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу: справочное пособие. М.: Изд. ФГУП ЦАГИ, 2014.
2. Парамонов П. В., Жаринов И. О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 1—17.

3. **Digital Avionics Handbook**. 3-d ed. / Ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. London, N. Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
4. **Федосов Е. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И.** Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии, 2015. № 1. С. 66—71.
5. **DO-297**. Integrated modular avionics (IMA) development guidance and certification considerations. Washington: RTCA Inc., 2005.
6. **Hainaut D.** Towards the Next Generation of Integrated Modular Avionics // Sixth European Aeronautics Days. Madrid. Spain. 2011. P. 135.
7. **Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A.** Avionics of Zero Maintenance Equipment // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010). P. 7—11.
8. **Бронников А. М.** Эффективность технической эксплуатации необслуживаемой в межсервисный период бортовой системы воздушного судна // Научный вестник МГТУ ГА. 2017.
9. **Redding L.** An Introduction to Integrated Vehicle Health Management — A Perspective from Literature // Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field / Ed. by I. K. Jennions. SAE Int., 2011. P. 17—26.
10. **Ezhilarasu C. M., Zakwan Skaf Z., Jennions I. K.** The application of reasoning to aerospace Integrated Vehicle Health Management (IVHM): Challenges and opportunities // Progress in Aerospace Sciences. 2019. N. 105. P. 60—73.
11. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-1-2011.** Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Ч. 1. Общие термины в области АИСД. Москва: Стандартинформ, 2012.
12. **Шубинский И. Б.** Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М.: Журнал Надежность, 2016. С. 39.
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. 72—82.
14. **Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М., Гамаюнов И. Ф.** Аналитический подход к формированию конфигураций технических систем // А и Т. 2017. № 9. С. 67—83.
15. **Агеев А. М.** Конfigurирование избыточных комплексов бортового оборудования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 4. С. 175—192.
16. **Буков В. Н., Бронников А. М., Агеев А. М., Гамаюнов И. Ф.** Интеграция комплекса оборудования выбранной конфигурации // А и Т. 2019. № 4. С. 105—125.
17. **Агеев А. М., Буков В. Н., Гамаюнов И. Ф., Шурман А. В.** Управление избыточностью вычислительных ресурсов интегрированной модульной авионики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 376—383.
18. **Клюев В. В., Пархоменко П. П., Абрамчик В. Е.** и др. Технические средства диагностирования: справочник / Под общей редакцией В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1989.
19. **Буков В. Н., Озеров Е. В., Шурман В. А.** Парный мониторинг избыточных технических систем // А и Т. 2020. № 1. С. 93—116.
20. **Буков В. Н., Бронников А. М., Сельвесюк Н. И.** Алгоритм локализации отказов бортового комплекса на основе смешанных направленных графов // Проблемы безопасности полетов. 2010. № 2. С. 57—71.
21. **Джанджгава Г. И., Дядищев А. В., Гарифов Р. Ш.** О концепции мониторинга технического состояния изделий авионики на основе применения средств и методов физической диагностики // Идеи и новации. 2018. Т. 6, № 3. С. 64—68.

Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing

A. M. Ageev, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, ageev_bbc@mail.ru,
Military Educational and Scientific Center "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy",
Voronezh Branch, Voronezh, 394064, Russian Federation,

Corresponding author: **Ageev Andrey M.**, Cand. Tech. Sc., Associate Professor, Military Educational and Scientific Center "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy", e-mail: ageev_bbc@mail.ru

Accepted on July 05, 2021

Abstract

The article proposes the principles of the main structural component's formation for the implementation of the task of managing the on-board equipment complex's (OEC) redundant resources: configurations tables, readiness indices and functional efficiency indicators of the software and hardware equipment components, allowing to formalize the processes of their development and use in the task of managing the excess on-board equipment complex resources. The separation of redundant components into groups of resources is proposed: computing modules, operating system core components, onboard software components, peripheral switching system components, hardware peripheral components. The general organization of redundant resources monitoring is formulated, which allows using the schemes and capabilities of both traditional built-in controls (the lower level of monitoring) and more advanced algorithmic solutions based on the logical processing of control results (the middle and upper levels of monitoring). The formation mechanisms, as well as the forms of configuration tables for hardware components and on-board applications, as well as the rules for filling them, focused on the use of configuration supervisors, are proposed. The principles of readiness indices and functional efficiency indicators forming have been developed and detailed, allowing to implement in the software environment the accounting of various factors that determine the capabilities and effectiveness of various computing tools and OEC configurations. A method for correcting the configurations functional efficiency indicator due to the mode generator, which adapts the complex reconfiguration to the conditions of its use, the tasks to be solved, and the operator's commands, is proposed. An example of considering the variety of tasks and modes of the OEC of an aircraft: flight stages, emergency situations, services and support, life support modes, the operation of the flight and navigation complex, as well as the crew control commands, is given. The proposed solutions can be used in computer-aided design systems for equipment complexes, flight safety systems, control of general aircraft equipment, software-controlled radio communication equipment systems, multispectral onboard reconnaissance systems, target designation and control of aviation weapons and special target loads of promising aviation complexes.

Keywords: on-board equipment complex, redundancy management, status monitoring, configuration table, readiness indicator, functional efficiency indicator

For citation:

Ageev A. M. Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 45–55.

DOI: 10.17587/mau.23.45-55

References

1. Aleshin B. S., Babkin V. I., Gohberg L. M. Foresight of Aviation Science and Technology Development until 2030 and Beyond: A Reference Guide, Moscow, Izd. FGUP CAGI, 2014 (in Russian).
2. Paramonov P. V., Zharinov I. O. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 1–17 (in Russian).
3. Digital Avionics Handbook. 3-d ed. / Ed. by C. R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell, London, N. Y., CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
4. Fedosov E. A., Kos'yanchuk V. V., Sel'vesyuk N. I. *Radioelektronnyye Tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 66–71 (in Russian).
5. DO-297. Integrated modular avionics (IMA) development guidance and certification considerations, Washington, RTCA Inc., 2005.
6. Hainaut D. Towards the Next Generation of Integrated Modular Avionics, Sixth European Aeronautics Days, Madrid, Spain. 30 March – 1 April, 2011, pp. 135.
7. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment, *27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010)*, pp. 7–11.
8. Bronnikov A. M. *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2017 (in Russian).
9. Redding L. An Introduction to Integrated Vehicle Health Management — A Perspective from Literature, Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field, Ed. by I. K. Jennions. SAE Int., 2011, pp. 17–26.
10. Ezhilarasu C. M., Zakwan Skaf Z., Jennions I. K. The Application of Reasoning To Aerospace Integrated Vehicle Health Management: Challenges and opportunities, *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, no. 105, pp. 60–73.
11. GOST R ISO / IEC 19762-1-2011. Information Technology. Automatic identification and data collection technologies (AISD). Harmonized dictionary. Part 1. General terms in the field of AISD., IDT, 2008 (in Russian).
12. SHubinskij I. B. Nadezhnye otkazoustojchivye informacionnye sistemy. Metody sinteza, Moscow, ZHurnal Nadezhnost', 2016, 39 p. (in Russian).
13. Ageev A. M., Bronnikov A. M., Bukov V. N., Gamayunov I. F. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2017, no. 3, pp. 72–82 (in Russian).
14. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Ageev A. M., Gamayunov I. F. *A i T*, 2017, no. 9, pp. 67–83 (in Russian).
15. Ageev A. M. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2018, no. 4, pp. 175–192 (in Russian).
16. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Ageev A. M., Gamayunov I. F. *A i T*, 2019, no. 4, pp. 105–125 (in Russian).
17. Ageev A. M., Bukov V. N., Gamayunov I. F., Shurman A. V. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 376–383 (in Russian).
19. Klyuev V. V., Parhomenko P. P., Abramchik V. E. *Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya: spravochnik*, Moscow, Mashinostroenie, 1989 (in Russian).
20. Bukov V. N., Ozerov E. V., Shurman V. A. *A i T*, 2020, no. 1, pp. 93–116 (in Russian).
21. Bukov V. N., Bronnikov A. M., Sel'vesyuk N. I. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2010, no. 2, pp. 57–71 (in Russian).
22. Dzhandzhgava G. I., Dyadishchev A. V., Garifov R. Sh. *Idei i novacii*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 64–68 (in Russian).



4-6 октября 2022 г. в Санкт-Петербурге
на базе АО "Концерн" ЦНИИ "Электроприбор" состоится

15-я мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2022)

Председатель президиума мультиконференции — академик РАН В. Г. Пешехонов
Мультиконференция включает пять локальных конференций:

- **XXXIII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова**

Председатель программного комитета - акад. РАН В. Г. Пешехонов

- **Конференция "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2022)**

Сопредседатели программного комитета: член-корр. РАН В. Н. Васильев,
д.т.н. проф. В. Н. Шелудько, член-корр. РАН Р. М. Юсупов

- **Конференция "Математическая теория управления и ее приложения" (МТУиП-2022)**

Сопредседатели программного комитета: член-корр. РАН Д. А. Новиков
и д.ф.-м.н. проф. Н. В. Кузнецов

- **Конференция "Управление в аэрокосмических системах" имени академика Е. А. Микрина (УАКС-2022)**

Сопредседатели программного комитета: акад. РАН С. Ю. Желтов,
член-корр. РАН В.А. Соловьев, член-корр. РАН М. В. Сильников

- **Конференция "Управление в морских системах" (УМС-2022)**

Сопредседатели программного комитета: акад. РАН Е. И. Якушенко,
акад. РАН С. Н. Васильев, член-корр. РАН А. Ф. Щербатюк

В рамках мультиконференции пройдет Семинар по закрытой тематике

Информация для связи:

ГНЦ РФ АО "Концерн" ЦНИИ "Электроприбор",
Тел.: +7 (812) 499-82-10 — Истомина Елена Анатольевна
+7 (812) 499 82 67 — Тарановский Дмитрий Олегович
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprub.ru

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: **+7(916) 392 21 67**

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

Сдано в набор 25.10.2021. Подписано в печать 09.12.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН122. 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