

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 21

2020

№ 11

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

ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь

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.

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

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление нулями и полюсами в задачах синтеза систем регулирования. Часть II. Компенсационно-модальный подход 611

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Машошин А. И., Пашкевич И. В. Проблемные вопросы интеллектуализации процессов управления автономными необитаемыми подводными аппаратами 622

Галимова Г. Р., Волков В. Г., Ахметзянов И. З. Упреждающее многосвязное управление движением автопоезда по криволинейной траектории 630

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Галузин В. А., Кутоманов А. Ю., Матюшин М. М., Скобелев П. О. Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем 639

Воронов Е. М., Карпунин А. А., Палкин М. В., Титков И. П. Оптимальное управление относительным движением группы космических аппаратов 651

Kulik A. A. Development of a Method for Computation of Aircraft Safety Control Signal 656

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. 21

2020

No. 11

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

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

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.

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

- Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of Zeros and Poles in Problems of Synthesis of Regulation Systems. Part II. Compensation Modal Approach 611

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. Problematic Issues of Intellectualizing the Control System of Autonomous Underwater Vehicles 622

- Galimova G. R., Volkov V. G., Akhmetzyanov I. Z. Predictive Coupled Control of the Road Train Longitudinal and Lateral Motion on a Curved Path 630

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Galuzin V. A., Kutomanov A. Yu., Matyushin M. M., Skobelev P. O. A Review of Modern Methods for Planning and Scheduling of the Operation in Advanced Space Systems 639

- Voronov E. M., Karpunin A. A., Palkin M. V., Titkov I. P. Satellite Formation Flying Maneuver Optimal Control 651

- Kulik A. A. Development of a Method for Computation of Aircraft Safety Control Signal 656

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

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет, Москва,
Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва

Управление нулями и полюсами в задачах синтеза систем регулирования. Часть II. Компенсационно-модальный подход¹

В теории и практике построения автоматических систем важное место занимает проблема синтеза линейных стационарных систем автоматического регулирования (САР) с заданными показателями динамического качества процессов регулирования, которые связывают с видом и параметрами переходной характеристики системы. Исходные требования к динамическому качеству САР возможно формализовать посредством задания желаемой структуры и параметров передаточной функции (ПФ) системы — коэффициента усиления, нулей и полюсов.

В механизме формирования желаемой ПФ синтезируемой САР необходимо учитывать фактор компенсации нулей и полюсов объекта управления: они хотя и исключаются из ПФ канала "уставка—выход", но становятся полюсами синтезируемой системы и неизбежно проявляются в ее динамике при действии внешних возмущений.

В первой части статьи анализируется эффект компенсации нулей и полюсов объекта управления в САР, а также исследуется влияние фактора неминимально-фазовых нулей на динамику систем. Данный эффект и его негативные результаты наглядно проявляются в классическом компенсационном подходе к синтезу регуляторов по априори заданной (желаемой, эталонной) ПФ замкнутой САР.

Во второй части статьи изложен классический полиномиальный метод синтеза модальных компенсаторов, принципиальным недостатком которого является появление неконтролируемых ("паразитных") нулей. Предлагаются новые схемы регулирования, совмещающие функциональные возможности компенсационного и модального подходов. Обсуждаются и анализируются два метода синтеза САР с желаемыми полюсами и нулями системы, исключая эффект появления "паразитных" нулей. В первом методе в структуру регулятора включаются последовательное и параллельное корректирующие звенья (КЗ). Последнее содержит малые постоянные времени, которые порождают быстрозатухающие моды, влиянием которых на процессы регулирования можно пренебречь. Во втором методе также используется последовательное КЗ, однако вместо параллельного КЗ используется модальная обратная связь (МОС). Ключевое значение при этом играет свойство инвариантности нулей ПФ объекта при замыкании его МОС. Обсуждается возможность компенсации нежелательных левых нулей объекта, которые попадают в область локализации спектров быстрозатухающих мод.

Ключевые слова: синтез системы регулирования, управление нулями и полюсами системы, компенсационно-модальный подход, полиномиальный синтез регуляторов, исключение эффекта "паразитных" нулей

Теория автоматического управления располагает аппаратом, который позволяет решать ее основные задачи. Таким аппаратом является полиномиальное исчисление.

Л. Н. Волгин

Введение

В современной теории автоматического управления одной из центральных является проблема синтеза систем автоматического регулирования (САР) с заданными требованиями к динамическому качеству процессов регулиро-

вания [1]. В первой части статьи [2] анализируется эффект компенсации нулей и полюсов объекта управления в системах регулирования, а также исследуется влияние фактора неминимально-фазовых нулей на их динамику.

В инженерной практике синтеза высококачественных САР большую популярность получили методы, основанные на использовании аппарата полиномиального исчисления [3—14]. Данные методы, именуемые полиномиальны-

¹Часть I опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2020, Т. 21, № 8.

ми (полиномиально-операторными или просто операторными), предлагают регулярные аналитические расчетные процедуры с полиномиальными диофантовыми уравнениями [15, 16]. Следует отметить, что полиномиальные методы синтеза САР с заданной передаточной функцией (ПФ) или заданными нулями и полюсами берут начало от работы В. Л. Волгина 1959 г. и получили развитие в работах М. Р. Елистратова, Л. П. Чхартишвили, Л. М. Скворцова, А. А. Воронова, Е. Н. Розенвассера, П. Д. Крутько, Г. И. Лозгачева, З. Ш. Ишматова, А. Р. Гайдука, В. В. Тютикова, С. В. Тарарыкина, П. Д. Кима, А. В. Воронина, К. М. Бобекова, А. А. Воеводы и др.

В настоящей, второй, части статьи анализируются структурные и динамические свойства классической схемы регулирования с модальным компенсатором. Исследуются возможности управления передаточными нулями и полюсами в системах регулирования с применением параллельных корректирующих звеньев и модальной обратной связи. Изложенные результаты развивают исследования авторов [1, 2, 17–22].

Классическая схема регулирования с модальным компенсатором

Обратимся к одноконтурной САР, представленной на рис. 1. Здесь u и y — соответственно регулирующий вход и регулируемый выход объекта управления, y^* — задание (уставка, целевое значение выхода), e — ошибка регулирования: $e = y^* - y$.

Положим, что объект управления является линейной стационарной динамической системой, и его ПФ представлена рациональной дробью

$$W_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)}, \quad (1)$$

где s — комплексная частота; $A_0(s)$ и $B_0(s)$ — взаимно простые полиномы вида

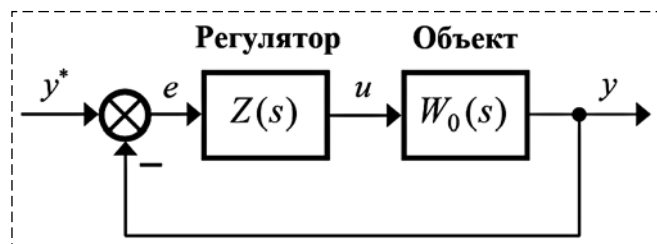


Рис. 1
Fig. 1

$$A_0(s) = s^{n_0} + \sum_{i=0}^{n_0-1} a_i^0 s^i, \quad B_0(s) = \sum_{j=0}^{m_0} b_j^0 s^j, \quad (2)$$

$n_0 = \deg A_0(s)$, $m_0 = \deg B_0(s)$; a_i^0 , b_j^0 — постоянные вещественные коэффициенты, причем $B_0(0) \neq 0$ и

$$m_0 < n_0. \quad (3)$$

Считаем, что объект вполне управляем и наблюдаем, так что ПФ (1) является несократимой дробью.

Динамический регулятор, именуемый далее *модальным компенсатором*, включен в прямую цепь САР и должен обеспечивать заданные полюсы замкнутой системе регулирования.

Представим ПФ регулятора в виде рациональной дроби

$$Z(s) = \frac{Q(s)}{P(s)}, \quad (4)$$

где $P(s)$ и $Q(s)$ — взаимно простые полиномы:

$$P(s) = s^v + \sum_{i=0}^{v-1} p_i s^i, \quad Q(s) = \sum_{j=0}^v q_j s^j. \quad (5)$$

Заметим, что выполняется требование физической реализуемости регулятора:

$$\deg Q(s) \leq \deg P(s).$$

ПФ замкнутой САР равна

$$W(s) = \frac{Z(s)W_0(s)}{1 + Z(s)W_0(s)} = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (6)$$

где

$$A(s) = A_0(s)P(s) + B_0(s)Q(s), \quad (7)$$

$$B(s) = B_0(s)Q(s). \quad (8)$$

Динамический порядок замкнутой САР равен

$$n = n_0 + v, \quad (9)$$

а ее характеристический полином $A(s)$ является унитарным (т.е. с единичным старшим коэффициентом) полиномом:

$$A(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i.$$

Обозначим $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ — множество корней данного полинома.

Введем вектор настроечных параметров $\mathbf{K}$ регулятора:

$$\mathbf{K} = (p_0, \dots, p_{v-1}, q_0, \dots, q_v).$$

Их число равно

$$\tilde{n} = 2v + 1. \quad (10)$$

Пусть задан *желаемый* спектр замкнутой САР — множество на s -плоскости, симметричное относительно вещественной оси:

$$\Lambda^* = \{\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_n^*\}.$$

Ему отвечает *желаемый* характеристический многочлен системы:

$$A^*(s) = \prod_{i=1}^n (s - \lambda_i^*) = s^n + a_{n-1}^* s^{n-1} + \dots + a_0^*. \quad (11)$$

Фактический и *желаемый* спектры должны совпадать:

$$\Lambda(\mathbf{K}) = \Lambda^*.$$

Данное условие равносильно равенству

$$A(\mathbf{K}, s) = A^*(s).$$

Следовательно, согласно соотношению (7) выбор структуры и параметров модального компенсатора сводится к решению диофантова уравнения в кольце полиномов

$$A_0(s)P(s) + B_0(s)Q(s) = A^*(s) \quad (12)$$

относительно неизвестных полиномов знаменателя $P(s)$ и числителя $Q(s)$ ПФ регулятора (4).

Очевидно, число настроечных параметров регулятора не может быть меньше степени характеристического полинома САР, так что

$$\tilde{n} \geq n.$$

Отсюда и из выражений (9), (10) получаем структурное требование к модальному компенсатору:

$$v \geq n_0 - 1, \quad (13)$$

при этом

$$n \geq 2n_0 - 1. \quad (14)$$

Теорема 1. Для разрешимости уравнения (12) при любом полиноме в правой части $A^*(s)$, степень которого отвечает условию (14), необходимо и достаточно, чтобы заданные полиномы $A_0(s)$ и $B_0(s)$ были взаимно простыми. ■

Доказательство. Разлагая дробь $\frac{A^*(s)}{A_0(s)B_0(s)}$ на слагаемые — целую часть и сумму простейших дробей, можно получить выражение

$$\frac{A^*(s)}{A_0(s)B_0(s)} = P_2(s) + \frac{P_1(s)}{B_0(s)} + \frac{Q(s)}{A_0(s)}. \quad (15)$$

Здесь $P_2(s)$ — выделенная целая часть, а остальные два слагаемых — правильные дроби, образованные суммированием простейших дробей, полюса которых являются соответственно корнями полиномов $B_0(s)$ и $A_0(s)$.

Отметим неравенства, вытекающие из соотношения (15):

$$\begin{aligned} \deg P_1(s) &\leq m_0 - 1, \\ \deg Q(s) &\leq n_0 - 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Анализ соотношения (15) с учетом (14) и (3) показывает, что $P_2(s)$ — ненулевой полином и

$$\deg P_2(s) = n - (n_0 + m_0) \geq 0. \quad (17)$$

Из неравенств (16) получаем

$$\frac{A^*(s)}{A_0(s)B_0(s)} = \frac{P(s)}{B_0(s)} + \frac{Q(s)}{A_0(s)},$$

где

$$P(s) = P_1(s) + P_2(s)B_0(s), \quad (18)$$

причем в силу (16), (17) и (3)

$$\deg P(s) = n - n_0.$$

Из теоремы 1 очевидным образом выводится следующее утверждение.

Утверждение 1. Для динамического порядка модального компенсатора должно выполняться условие (13), причем в случае минимального порядка

$$v = n_0 - 1, \quad \tilde{n} = n = 2n_0 - 1. \quad \blacksquare \quad (19)$$

Существует ряд способов решения полиномиального уравнения (12). Укажем два из них.

Первый способ основан на выполнении разложения (15), в результате чего находятся полиномы $P_1(s)$, $P_2(s)$, $Q(s)$ и затем полином $P(s)$ согласно формуле (18).

Второй способ заключается в следующем. Уравнение (12) можно развернуть в систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов полиномов $P(s)$ и $Q(s)$: в левой части уравнения раскрываются скобки, приводятся подобные члены и затем приравниваются коэффициенты у подобных одночленов в левой и правой частях равенства. В итоге получаем линейную систему алгебраических уравнений n -го порядка относительно $\tilde{n} = 2v + 1$ неизвестных $p_0, \dots, p_{v-1}, q_0, \dots, q_v$. Данная система уравнений всегда будет совместной, если $\tilde{n} \geq n$, причем в случае строгого неравенства она будет иметь бесконечное

множество решений, а в случае равенства — единственное решение.

Астатическое модальное регулирование.

Важнейшим требованием к синтезируемому САР является требование астатизма по отношению к задающему воздействию. Будем исходить из требования астатизма 1-го порядка. Оно структурно обеспечивается, если прямая цепь системы включает нулевой полюс $s = 0$. Если объект является статическим, то необходимо данный полюс привести в прямую цепь посредством регулятора, т.е. необходимо модифицировать его структуру, положив

$$P(s) = s\tilde{P}(s),$$

где $\tilde{P}(s)$ — унитарный полином. Теперь наименьший динамический порядок модального компенсатора будет равен

$$v = n_0$$

и

$$\tilde{P}(s) = s^{v-1} + \sum_{i=0}^{v-2} p_i s^i, \quad Q(s) = \sum_{j=0}^v q_j s^j.$$

Эффект появления "паразитных" нулей

Рассмотренная схема САР с модальным компенсатором имеет существенный недостаток: согласно соотношениям (6) и (8) нули полинома $Q(s)$, т.е. числителя ПФ (4) регулятора, становятся нулями ПФ (6) синтезированной САР. "Паразитный" эффект появления таких нулей может быть нежелательным с точки зрения динамического качества процессов регулирования.

Пример 1. Пусть ПФ объекта равна

$$W_0(s) = \frac{1}{s(s^2 + s + 5)}. \quad (20)$$

Так как $n_0 = 3$, то согласно (19) $n = 5$.

В качестве желаемого характеристического полинома замкнутой САР выберем следующий полином:

$$\chi^*(s) = (s + 2)^n. \quad (21)$$

Для ПФ модального компенсатора и замкнутой САР получаем выражения

$$Z(s) = \frac{9s^2 - 50s + 32}{s^2 + 9s + 26}, \quad W(s) = \frac{9s^2 - 50s + 32}{(s + 2)^5}.$$

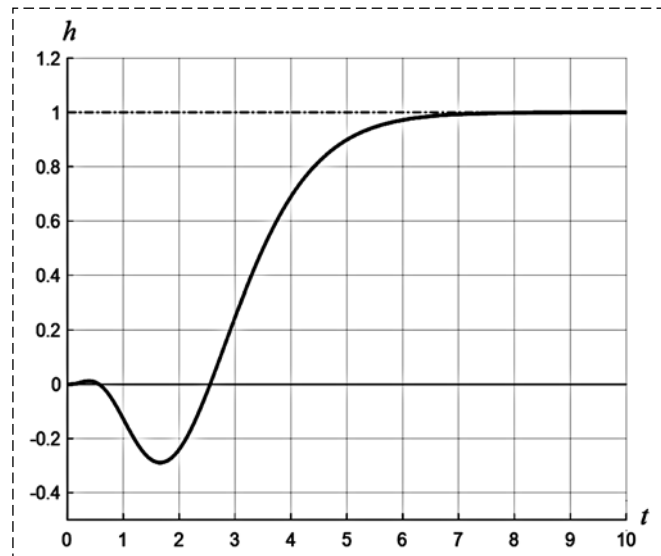


Рис. 2
Fig. 2

Итак, в канале регулирования появились "паразитные" комплексные неминимально-фазовые нули. Переходная характеристика САР $h(t)$ представлена на рис. 2.

Виден негативный результат появления и действия "паразитных" нулей — в переходной характеристике САР имеется отрицательный "всплеск".

В свете вышеизложенного теоретический и практический интерес представляет проблема разработки методов синтеза САР, исключающих эффект появления "паразитных" нулей. Далее излагаются два таких метода, основанных на идее параллельной модальной коррекции объекта управления.

Схема регулирования с использованием параллельной модальной коррекции

Исследуем функциональные возможности САР, схема которой включает параллельное и последовательное корректирующие звенья (КЗ) как показано на рис. 3. ПФ данных звеньев обозначим соответственно $Z_1(s)$ и $Z_2(s)$, полагая

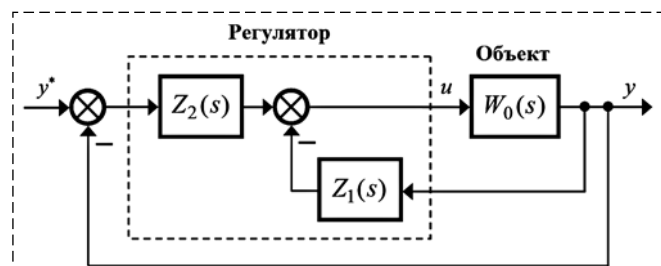


Рис. 3
Fig. 3

$$Z_1(s) = \frac{Q_1(s)}{P_1(s)}, \quad (22)$$

$$Z_2(s) = \frac{Q_2(s)}{P_2(s)}, \quad (23)$$

где $\deg P_1(s) = \mu_1$, $\deg Q_1(s) = \nu_1$, $\deg P_2(s) = \mu_2$, $\deg Q_2(s) = \nu_2$.

Условия физической реализуемости КЗ:

$$\nu_1 \leq \mu_1, \quad \nu_2 \leq \mu_2. \quad (24)$$

Параллельная коррекция объекта дает ПФ

$$W_1(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s) + B_0(s) \frac{Q_1(s)}{P_1(s)}}.$$

ПФ замкнутой САР определяется формулой

$$W(s) = \frac{Z_2(s)W_1(s)}{1 + Z_2(s)W_1(s)} \quad (25)$$

и, следовательно, равна

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} B(s) &= B_0(s)P_1(s)Q_2(s), \\ A(s) &= A_0(s)P_1(s)P_2(s) + \\ &+ B_0(s)(P_1(s)Q_2(s) + P_2(s)Q_1(s)). \end{aligned} \quad (27)$$

Отсюда согласно соотношениям (3) и (24)

$$n = \deg A(s) = n_0 + \mu_1 + \mu_2. \quad (28)$$

Общее число неизвестных коэффициентов числителей и знаменателей дробей (22) и (23) равно

$$\tilde{n} = \mu_1 + \nu_1 + \mu_2 + \nu_2 + 2.$$

Учтем, что числитель (27) ПФ (26) не может содержать "паразитные" нули, т.е. все нули полинома $P_1(s)Q_2(s)$ считаются заданными. Таким образом, общее число настраиваемых параметров регулятора равно

$$\tilde{n}' = \nu_1 + \mu_2 + 2. \quad (29)$$

Для формирования желаемого характеристического полинома системы должно выполняться условие

$$\tilde{n}' \geq n.$$

Но тогда из соотношений (28), (29), (24) получаем следующее *ограничение* на применимость изложенного метода синтеза САР:

$$n_0 \leq 2.$$

Более того, можно показать, что при $n_0 = 2$ в данной схеме САР не удастся обеспечить требование астатизма.

Схема регулирования с использованием аппроксимационной модальной коррекции

Изложим метод параллельной модальной коррекции, в основу которого положена идея формирования в модальной структуре синтезируемой САР двух типов мод: *быстрозатухающих* и остальных, именуемых *доминирующими*, причем влиянием первых на процессы регулирования можно пренебречь, так что динамика САР практически определяется доминирующими модами.

Выделим в s -плоскости области локализации спектров доминирующих и быстрозатухающих мод:

$$\begin{aligned} D_d &= \{s \mid -\gamma_d \leq \operatorname{Re} s < 0\}, \\ D^+ &= \{s \mid \operatorname{Re} s < -\gamma^+\}, \end{aligned} \quad (30)$$

причем полагаем $\gamma_d < \gamma^+$. Спектр синтезированной САР должен включать два подмножества:

$$\Lambda = \Lambda_d \cup \Lambda^+,$$

где $\Lambda_d \subset D_d$ и $\Lambda^+ \subset D^+$.

Соответственно характеристический полином САР разбивается на два полиномиальных множителя

$$\chi(s) = \chi_d(s)\chi^+(s), \quad (31)$$

множества корней которых совпадают соответственно с Λ_d и Λ^+ .

Зададим *желаемую* ПФ замкнутой САР

$$W^*(s) = \frac{k(\tau s + 1)}{A^*(s)}, \quad (32)$$

где $A^*(s)$ — унитарный полином с заданным множеством нулей $\Lambda_d^* \subset D_d$.

В области *рабочих частот*

$$|s| \leq \gamma_d \quad (33)$$

должно выполняться приближение

$$W(s) \cong W^*(s). \quad (34)$$

Предлагаемый метод предполагает дополнительные ограничения на класс объектов управления: $m_0 = 0$, так что

$$W_0(s) = \frac{k_0}{A_0(s)}. \quad (35)$$

Для ПФ параллельного КЗ положим

$$P_1(s) = (T_d s + 1)^{n_0-1}, \quad Q_1(s) = \sum_{i=0}^{n_0-1} q_i^1 s^i,$$

где $T_d > 0$ — заданная малая постоянная времени: $T_d \cdot \gamma^+ < 1$.

Найдем ПФ скорректированного объекта:

$$W_1(s) = \frac{k_0}{A_0(s) + k_0 \frac{Q_1(s)}{P_1(s)}}. \quad (36)$$

При анализе процессов регулирования в области рабочих частот (33) инерционностью параллельного КЗ можно пренебречь:

$$P_1(s) \cong 1, \quad (37)$$

и для ПФ (36) использовать приближение

$$W_1(s) \cong \frac{k_0}{A_0(s) + k_0 Q_1(s)}.$$

ПФ замкнутой САР определяется формулой (25). Для ПФ последовательного КЗ примем

$$Z_2(s) = \frac{k_2(\tau s + 1)}{s}, \quad (38)$$

где k_2 — настраиваемый параметр; $\tau > 0$ — заданная постоянная времени.

Из соотношений (25), (36), (38) выводим

$$W(s) = \frac{k_0 k_2 (\tau s + 1)}{s \left[A_0(s) + k_0 \frac{Q_1(s)}{P_1(s)} \right] + k_0 k_2 (\tau s + 1)}.$$

В условиях приближения (37)

$$W(s) \cong \frac{k_0 k_2 (\tau s + 1)}{A_d(s)},$$

где

$$A_d(s) = s[A_0(s) + k_0 Q_1(s)] + k_0 k_2 (\tau s + 1). \quad (39)$$

Полагая

$$\deg A^*(s) = n_0 + 1$$

потребуем выполнения равенства

$$A_d(s) = A^*(s).$$

Отсюда и из выражения (39) находим

$$k_2 = A^*(0)/k_0,$$

$$Q_1(s) = \frac{1}{k_0} \left[\frac{A^*(s) - k_0 k_2 (\tau s + 1)}{s} - A_0(s) \right].$$

Предложенный метод по сути является *аппроксимационным*, что отражает приближение (34). Его теоретической основой является следующее утверждение, которое нетрудно доказать.

Утверждение 2. При достаточно малой постоянной времени T_d характеристический многочлен САР и его ПФ удовлетворяет требованиям (31) и (34), причем при $T_d \rightarrow 0$ будут выполняться асимптотические равенства

$$\frac{\chi^+(s)}{P_1(s)} \sim 1, \quad \chi_d(s) \sim A^*(s), \quad W(s) \sim W^*(s). \quad \blacksquare$$

Пример 2. Решим задачу синтеза САР для объекта с ПФ (20) на основе изложенного метода аппроксимационной модальной коррекции. Опять выберем желаемый характеристический многочлен вида (21). Так как $n_0 = 3$, то

$$A^*(s) = (s + 2)^4.$$

Ниже в таблице представлено множество полюсов Λ_d (с округлением до сотых) и Λ^+ (с округлением до целого) замкнутой САР для различных значений постоянной времени T_d .

T_d	Λ_d	Λ^+
0,0001	-1,78; -1,95; -1,95; -2,31	-9732; -10261
0,001	-1,63; -1,88; -1,88; -2,68	-912; -1080
0,015	-1,35; -1,65±0,64j; -5,00	-39; -85

На рис. 4 представлена переходная характеристика САР для варианта $T_d = 0,015$. Отметим, что она практически совпадает с переходной характеристикой, отвечающей желаемой ПФ (32).

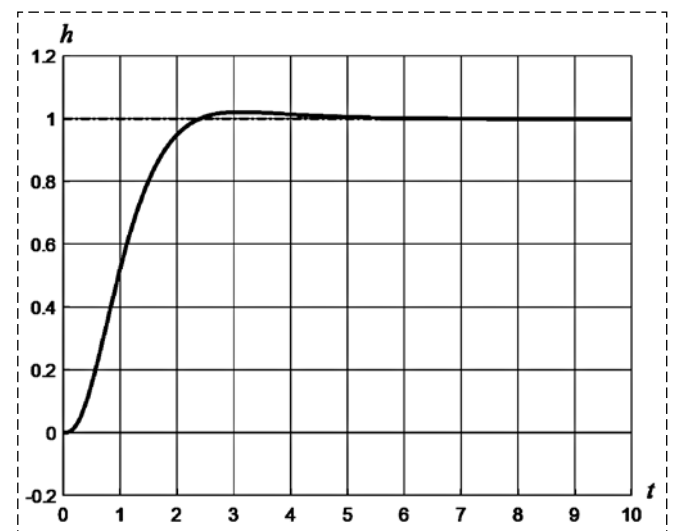


Рис. 4
Fig. 4

Обратная связь по состоянию и нули канала управления

Модальная обратная связь по состоянию (МОС) позволяет управлять полюсами системы. Выясним, каким образом она влияет на передаточные нули каналов управления.

На рис. 5 представлена схема модальной коррекции объекта с помощью МОС. Управляющее воздействие состоит из двух слагаемых:

$$u = -u_1 + v. \quad (40)$$

Здесь v — входной сигнал, а

$$u_1 = \mathbf{K}\mathbf{x} \quad (41)$$

— сигнал, формируемый МОС на основе информации о векторе переменных состояния объекта $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{n_0}$; $\mathbf{K}$ — постоянная вещественная матрица размера $1 \times n_0$.

Теорема 2. Обратная связь по состоянию не изменяет передаточные нули объекта управления. ■

Доказательство. Положим, что объект вполне управляем и наблюдаем, а его ПФ $W_0(s)$ определяется соотношениями (1), (2).

Для анализа действия МОС перейдем к канонической форме Фробениуса. Используя метод фазовой переменной [23], представим динамику объекта уравнениями

$$A_0(p)\xi(t) = u(t); \quad (42)$$

$$y(t) = B_0(p)\xi(t), \quad (43)$$

где ξ — скалярная переменная состояния; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования; $A_0(p)$ и $B_0(p)$ — линейные дифференциальные операторы:

$$A_0(p) = p^{n_0} + \sum_{i=0}^{n_0-1} a_i^0 p^i, \quad B_0(p) = \sum_{j=0}^{m_0} b_j^0 p^j.$$

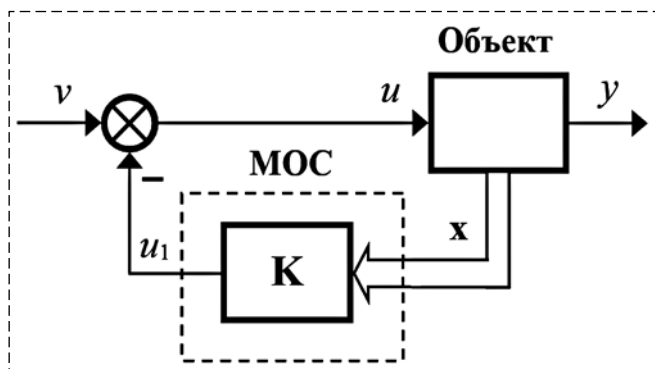


Рис. 5
Fig. 5

Рассмотрим вектор состояния $\mathbf{x}_F$, образованный переменной ξ и ее производными:

$$\mathbf{x}_F = (\xi, \xi^{(1)}, \dots, \xi^{(n_0-1)})^T. \quad (44)$$

В этих переменных состояния уравнение (41) принимает вид

$$u_1 = \mathbf{K}_F \mathbf{x}_F. \quad (45)$$

Запишем вектор-строку $\mathbf{K}_F$ следующим образом:

$$\mathbf{K}_F = (a_0^1 - a_0^0, a_1^1 - a_1^0, \dots, a_{n_0-1}^1 - a_{n_0-1}^0). \quad (46)$$

Введем также дифференциальный оператор

$$A_1(p) = p^{n_0} + \sum_{i=0}^{n_0-1} a_i^1 p^i.$$

Тогда с учетом соотношений (44)—(46) получаем операторное выражение

$$u_1(t) = (A_1(p) - A_0(p))\xi(t)$$

Отсюда и из уравнений (40), (42) следует дифференциальное уравнение, определяющее динамику состояния объекта:

$$A_1(p)\xi(t) = v(t). \quad (47)$$

Уравнения (43) и (47) определяют ПФ канала "вход v —выход y ":

$$W_1(s) = \frac{B_0(s)}{A_1(s)}. \quad (48)$$

Таким образом, обратная связь по состоянию не влияет на числитель ПФ скорректированного объекта управления. Нетрудно также убедиться, что данный результат не зависит от выбора переменных состояния: в нашем случае использовалась каноническая форма Фробениуса.

Если объект не является вполне управляемым и наблюдаемым, то приведенные выкладки относятся к его вполне управляемой и наблюдаемой подсистеме, а именно она определяет ПФ объекта, охваченного обратной связью по состоянию. Теорема доказана.

Заметим, что в случае неполной информации о состоянии объекта в структуру модальной обратной связи можно включать наблюдающие устройства, при этом сформулированная теорема также будет справедлива.

Из данной теоремы вытекает следующее утверждение, имеющее важное методологическое значение.

Утверждение 3. Числитель ПФ скорректированного объекта инвариантен к действию статических и динамических МОС. ■

Схемы регулирования с модальной обратной связью

Обсудим возможности совместного использования в системах регулирования последовательного корректирующего звена (ПКЗ) и МОС. Такая схема построения САР представлена на рис. 6.

Полагаем, что динамический порядок ПКЗ равен ν , его ПФ представляется дробью

$$Z(s) = \frac{Q(s)}{P(s)}$$

и соотношениями (5), а МОС (41) формирует ПФ замыкаемого объекта (48).

ПФ замкнутой САР равна

$$W(s) = \frac{Z(s) W_1(s)}{1 + Z(s) W_1(s)} = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Здесь

$$B(s) = B_0(s)Q(s),$$

$$A(s) = A_1(s)P(s) + B_0(s)Q(s).$$

Динамический порядок замкнутой САР определяется выражением (9).

Пусть $A^*(s)$ — желаемый характеристический полином замкнутой САР (11). Тогда должно выполняться равенство

$$A_1(s)P(s) + B_0(s)Q(s) = A^*(s). \quad (49)$$

Будем исходить из требования астатизма по отношению к задающему воздействию.

Обсудим три частных варианта решения задачи синтеза САР с МОС.

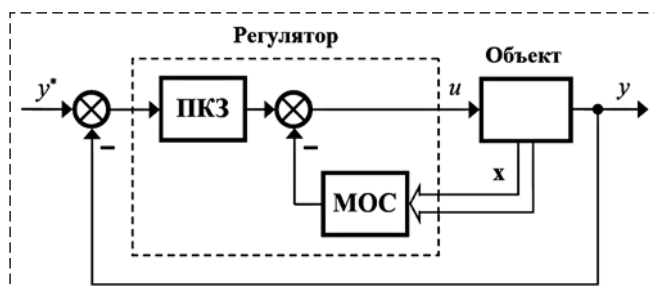


Рис. 6
Fig. 6

Вариант 1. Пусть ПФ объекта имеет вид (35), а ПКЗ является пропорциональным звеном ($\nu = 0$):

$$Z(s) = k.$$

Тогда уравнение (49) принимает вид

$$A_1(s) + k_0 k = A^*(s). \quad (50)$$

Для обеспечения астатизма положим

$$A_1(0) = 0,$$

т.е. нулевой полюс в разомкнутой САР формируется МОС. Отсюда и из уравнения (50) получаем:

$$k = \frac{A^*(0)}{k_0} = \frac{a_0^*}{k_0}, \quad A_1(s) = A^*(s) - k_0 k.$$

Пример 3. Рассмотрим объект управления с той же ПФ (20), что и в примере 1. Поскольку динамический порядок САР совпадает с порядком объекта, полагаем $n = 3$. На рис. 7 представлена переходная характеристика САР, синтезированной исходя из вида (21) желаемого характеристического полинома.

Вариант 2. Пусть ПФ объекта имеет вид (35), а желаемая ПФ замкнутой системы задается выражением (32).

Зададим ПФ ПКЗ в виде

$$Z(s) = \frac{k(\tau s + 1)}{s}.$$

Таким образом, $n = n_0 + 1$. Теперь уравнение (49) принимает вид

$$A_1(s)s + k_0 k(\tau s + 1) = A^*(s).$$

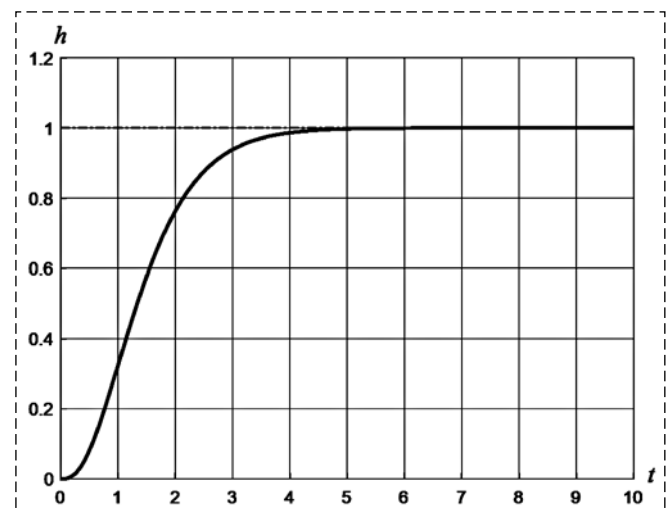


Рис. 7
Fig. 7

Отсюда находим

$$k = \frac{A^*(0)}{k_0} = \frac{a_0^*}{k_0}, \quad A_1(s) = \frac{A^*(s) - k_0 k (\tau s + 1)}{s}.$$

Вариант 3. Покажем возможность совмещения изложенного подхода к синтезу САР и идеи принудительной компенсации нулей объекта.

Выделим в s -плоскости области локализации спектров доминирующих и быстро затухающих мод (30). Считаем, что спектр синтезированной САР может включать два подмножества:

$$\Lambda = \Lambda^* \cup \Lambda^+,$$

где $\Lambda^* \subset D$ и $\Lambda^+ \subset D^+$.

Пусть все нули ПФ объекта являются нежелательными и попадают в допустимую область D^+ . Представим числитель ПФ в виде

$$B_0(s) = k_0 B_0^+(s),$$

где $B_0^+(s)$ — унитарный полином.

Компенсируем данные нули посредством МОС, полагая

$$A_1(s) = \tilde{A}_1(s) B_0^+(s).$$

Но тогда ПФ (48) после сокращения совпадающих нулей и полюсов в канале управления примет вид

$$W_1(s) = \frac{k_0}{\tilde{A}_1(s)}.$$

Отметим два результата описанной компенсации: во-первых, устранение нулей объекта из контура регулирования и, во-вторых, редукция (уменьшение размерности) задачи синтеза САР.

Теперь настроечные параметры САР определяются уравнением

$$\tilde{A}_1(s)P(s) + k_0 Q(s) = \tilde{A}^*(s),$$

где $\tilde{A}^*(s)$ — формируемый знаменатель ПФ САР. При этом характеристический полином системы оказывается равным

$$\chi(s) = \tilde{A}^*(s) B_0^+(s).$$

Отметим, что скомпенсированные нули ПФ объекта являются полюсами ненаблюдаемой части системы и поэтому не влияют на процессы отработки уставки. Данным полюсам отвечают быстро затухающие моды, так что они заведомо приемлемы с точки зрения качества демпфирования переходных процессов, вызванных возмущениями состояния объекта управления.

Заключение

Рассмотрены некоторые актуальные аспекты проблемы управления передаточными нулями и полюсами в задачах синтеза САР. Изложен классический полиномиальный метод синтеза модальных компенсаторов. Его принципиальным недостатком является появление неконтролируемых ("паразитных нулей") в ПФ замкнутой САР, которые могут негативно сказываться на качестве процессов регулирования.

В связи с этим теоретический и практический интерес представляет проблема разработки методов синтеза САР с желаемыми полюсами и нулями системы, исключающих эффект появления "паразитных" нулей. Обсуждаются и анализируются два таких метода.

В первом методе в структуру регулятора включаются последовательное и параллельное КЗ. Последнее содержит малые постоянные времени, которые порождают быстро затухающие моды, влиянием которых на процессы регулирования можно пренебречь.

Во втором методе также используется последовательное КЗ, однако вместо параллельного КЗ используется МОС. Ключевое значение при этом играет свойство инвариантности нулей ПФ объекта при замыкании его МОС.

Обсуждается возможность компенсации нежелательных левых нулей объекта, которые вследствие удаленности от мнимой оси попадают в область локализации спектров быстро затухающих мод.

Список литературы

1. Солодовников В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987. 84 с.
2. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Управление передаточными нулями и полюсами в задачах синтеза систем регулирования. Ч. I. Компенсационный подход // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 8. С. 443–452.
3. Волгин Л. Н. Элементы теории управляющих машин (метод полиномиальных уравнений в задачах синтеза систем автоматического управления с цифровыми вычислительными машинами). М.: Сов. радио, 1962. 164 с.
4. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977. 560 с.
5. Kučera V. Discrete Linear Control: The Polynomial Equation Approach. Prague: Academia, 1979. 206 p.
6. Волгин Л. Н. Оптимальное дискретное управление динамическими системами М.: Наука, 1986. 240 с.
7. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Grimble M. J., Kučera V. Polynomial Methods for Control Systems Design. Springer-Verlag, 1996. 260 p.

9. **Chen C. T.** Linear System Theory and Design. New York: Oxford University Press, 1999. 334 p.
10. **Тютиков В. В., Таратыкин С. В.** Робастное модальное управление технологическими объектами. Иваново: ИГУ им. В. И. Ленина, 2006. 256 с.
11. **Ишматов З. Ш.** Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы: монография. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 277 с.
12. **Söylemez M. T., Üstoglu I.** Polynomial Control Systems // IEEE Control Systems Magazine. 2007. Vol. 27, N. 4. P. 124–137.
13. **Гайдук А. Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 360 с.
14. **Ким Д. П.** Алгебраические методы синтеза систем автоматического управления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 164 с.
15. **Kučera V.** Diophantine Equations in Control — A survey // Automatica. 1993. Vol. 29, N. 6. P. 1361–1375.
16. **Волгин Л. Н.** Диофантово полиномиальное исчисление и его применение для решения математических задач теории управления // Автоматика. 1987. № 1. С. 43–52.
17. **Филимонов Н. Б.** Управление переходными процессами в линейных конечномерных объектах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.02. МВТУ им. Н. Э. Баумана, М., 1979. 395 с.
18. **Солодовников В. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Анализ компенсационного подхода к синтезу систем управления // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1979. № 2. С. 27–32.
19. **Филимонов Н. Б.** К вопросу о разрешимости задачи В. Солодовникова // Труды МВТУ № 314. Системы автоматического управления. 1979. Вып. 7. С. 60–71.
20. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** К проблеме динамического качества линейных стационарных систем регулирования // Аналитические методы синтеза регуляторов: Межвузовский научный сборник. Саратов: СПИ. 1981. С. 94–106.
21. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Фактор правых передаточных нулей в задачах автоматического регулирования // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. Iss. 15. P. 103–109.
22. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Некоторые аспекты модального синтеза систем автоматического регулирования // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2018. Iss. 11. P. 82–88.
23. **Солодовников В. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Метод фазового пространства в задачах управления линейными конечномерными объектами // Автоматика. 1981. № 2. С. 55–67.

Control of Zeros and Poles in Problems of Synthesis of Regulation Systems. Part II. Compensation Modal Approach

A. B. Filimonov, filimon_ab@mail.ru,

Moscow Technological University, 119454, Moscow, Russian Federation,

N. B. Filimonov, nbfilimonov@mail.ru,

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author: **Filimonov Nikolay B.**, Professor, Dr. Sci. Tech., Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russian Federation, e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Accepted on July, 28, 2020

Abstract

The synthesis problem of linear stationary automatic regulation systems (ARS) with the given indicators of the dynamic quality of regulation processes occupies the important place in the theory and practice of the automatic systems' construction. The given indicators are connected with the type and parameters of transient characteristics of the regulation systems. The initial requirements for the dynamic quality of ARS it is possible to formalize via the representation of the desired structure and parameters of the transfer function (TF) of the system namely amplification coefficient, zeros and poles. In mechanism of formation of the desired TF which is synthesized by ARS it is necessary to take into account the factor of compensation of zeros and poles of the controlled object. Although they are excluded from TF channel "setpoint — output" of the system, but become the poles of the synthesized system and will inevitably develop its dynamics under external perturbations. The effect of compensation of zeros and poles of the control object in ARS is analyzed in the first part of the article. And also the influence of the factor of non-minimal phase zeros for the dynamics of regulation systems is researched. The given effect and its negative results are visually shown in the classical compensation approach to the synthesis of regulators by a priori given (desired, standard) TF of closed ARS. The classical polynomial method of the modal compensators synthesis, the principle deficiency of which is the appearance of uncontrolled ("parasitic") zeros is presented in the second part of the article. The new regulation schemes combining the functional possibilities of the compensation and modal approaches are suggested. Two methods of ASR synthesis with desired poles and zeros of the system, excluding the effect of the appearance of "parasitic" zeros, are discussed and analyzed. In the first method the sequential and parallel correction links (CL) are included into the regulator's structure. The latter one contains small constant time which generate rapidly damped modes. One may neglect by their influence on the regulation processes. The sequential CL is also used in the second method, but instead of parallel CL modal feedback (MFB) is used. In this case the key value has the invariance property of the zeros of object's TF when closing its MFB. The possibility of compensating unwanted left zeros of an object that fall within the localization region of fast-fading mode spectra is discussed.

Keywords: synthesis of regulation system, control by zeros and poles of system, compensation-modal approach, polynomial synthesis of regulators, exclusion of the effect of "parasitic" zeros

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Control of Zeros and Poles in Problems of Synthesis of Regulation Systems. Part II. Compensation Modal Approach, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 611–621.

DOI: 10.17587/mau.21.611-621

References

1. **Solodovnikov V. V., Filimonov N. B.** Dynamic Quality of Automatic Control Systems, Moscow, BMSTU, 1987, 84 p. (in Russian).
2. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Control of Zeros and Poles in Problems of Synthesis of Regulation Systems. Part I. Compensation Approach, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 8, pp. 443–452.
3. **Tsyarkin Ya. Z.** Fundamentals of the Theory of Automatic Systems, Moscow, Nauka, 1977, 560 p. (in Russian).
4. **Volgin L. N.** Elements of the Theory of Controlling Machines (Method of Polynomial Equations in the Problems of Synthesis of Automatic Control Systems with Digital Computers), Moscow, Sovetskoe radio, 1962, 164 p. (in Russian).
5. **Kučera V.** Discrete Linear Control: The Polynomial Equation Approach, Prague, Academia, 1979, 206 p.
6. **Volgin L. N.** Optimal Discrete Control of Dynamic Systems, Moscow, Nauka, 1986, 240 p. (in Russian).
7. **Krut'ko P. D.** Inverse Problems of Dynamics of Controlled Systems. Linear Model, Moscow, Nauka, 1987, 304 p. (in Russian).
8. **Grimble M. J., Kučera V.** Polynomial Methods for Control Systems Design, Springer-Verlag, 1996, 260 p.
9. **Chen C. T.** Linear System Theory and Design, New York, Oxford University Press, 1999, 334 p.
10. **Tyutikov V. V., Tararykin S. V.** Robust Modal Management of Technological Objects, Ivanovo, IGEU named after V. I. Lenin, 2006, 256 p. (in Russian).
11. **Ishmatov Z. S.** Microprocessor Based Control of Electric Drives and Production Facilities. Polynomial Methods, Yekaterinburg, Publishing house of UGTU-UI, 2007, 278 p. (in Russian).
12. **Söylemez M. T., Üstoglu I.** Polynomial Control Systems, *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, vol. 27, no. 4, pp. 124–137.
13. **Gaiduk A. R.** Theory and Methods of Analytical Synthesis of Automatic Control Systems (Polynomial Approach). Moscow, Fizmatlit, 2012, 360 p. (in Russian).
14. **Kim D. P.** Algebraic Methods of Automatic Control System Synthesis, Moscow, Fizmatlit, 2014, 164 p. (in Russian).
15. **Kučera V.** Diophantine Equations in Control — A survey, *Automatica*, 1993, vol. 29, no. 6, pp. 1361–1375.
16. **Volgin L. N.** Diophantine Polynomial Calculus and its Application to Solving Mathematical Problems in Control Theory, *Automatic*, 1987, no. 1, pp. 43–52 (in Russian).
17. **Filimonov N. B.** Control of Transients in Linear Finite-Dimensional Objects: Dis. ... Cand. Tech. Science: 05.13.02. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1979, 395 p. (in Russian).
18. **Solodovnikov V. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Analysis of the Compensation Approach to the Synthesis of Control Systems, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*, 1979, no. 2, pp. 27–32 (in Russian).
19. **Filimonov N. B.** The Question of the Solvability of Problem of V. V. Solodovnikov, *Proceedings of the Bauman*, no. 314, *Automatic Control Systems*, iss. 7, Moscow, BMSTU, 1979, pp. 60–71 (in Russian).
20. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** On the Problem of Dynamic Quality of Linear Stationary Control Systems. *Analytical Methods of Synthesis of Regulators: Interuniversity Science*, Saratov, SPTU, 1981, pp. 94–106 (in Russian).
21. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Factor of the Right Transmission Zeroes in the Problems of Automatic Regulation, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2019, iss. 15, pp. 103–109 (in Russian).
22. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Some Aspects of Modal Synthesis of Automatic Regulation Systems, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2018, iss. 11, pp. 82–88 (in Russian).
23. **Solodovnikov V. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Method of Phase Space in Control Problems of Linear Finite-Dimensional Objects, *Automatics*, 1981, no. 2, pp. 55–67 (in Russian).



16—19 марта 2021 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.

А. И. Машошин, д-р техн. наук, проф., aimashoshin@mail.ru,

И. В. Пашкевич, глав. специалист, iv@bk.ru,

АО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", г. Санкт-Петербург

Проблемные вопросы интеллектуализации процессов управления автономными необитаемыми подводными аппаратами¹

Рассмотрены пути интеллектуализации процессов управления автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) на примере решения трех задач, от которых во многом зависит успешное применение АНПА.

Первой задачей является создание системы управления (СУ) АНПА, обеспечивающей достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, обусловленных как внешними, так и внутренними причинами, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия. Показано, что для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура, в которой каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. СУ должна быть оснащена набором адаптивных алгоритмов, обеспечивающих: управление АНПА в условиях возникновения нештатных ситуаций с учетом ограничений по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной подводной навигации, дальности гидроакустической связи; рациональное распределение энергоресурсов по системам АНПА в соответствии со сложившейся обстановкой; сохранение функциональной устойчивости АНПА при частичной неисправности технических средств.

Второй задачей является создание системы подводной навигации, обеспечивающей выполнение миссий АНПА на больших удалениях от пункта базирования. Поскольку навигация АНПА с использованием только бортовых средств (инерциальной навигационной системы и лага) не обеспечивает необходимой точности, необходимым условием плавания АНПА на большие расстояния является выполнение наблюдения с использованием внешних источников, выбор которых в сложившихся условиях представляет собой нетривиальную задачу.

Третьей задачей является создание системы сетевой подводной связи (СПС), обеспечивающей групповое применение АНПА. Наземным аналогом СПС является сетевая радиосвязь. Но если последняя достаточно хорошо развита, то первая только делает начальные шаги. Обусловлено это как более поздней практической востребованностью СПС, так и множеством фундаментальных физических факторов, затрудняющих развитие СПС, к которым относятся: существенно ограниченная полоса частот, которая может использоваться на практике для передачи сигнала; большое время распространения гидроакустического сигнала по сравнению с радиосигналом; образование протяженных зон тени и замирания связного сигнала вследствие его многолучевого распространения; значительные доплеровские искажения; быстрая изменчивость характеристик гидроакустической среды.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, подводная навигация, сетевая подводная связь

Введение

Необитаемые подводные аппараты (НПА) являются одним из наиболее перспективных средств изучения и освоения Мирового океана [1–8]. Их созданием занимаются более сотни компаний в десятках стран мира. Вместе с тем можно констатировать, что на сегодняшний день реальный прогресс достигнут при использовании только телеуправляемых НПА. Автономные же НПА (АНПА) полноценно решать возлагаемые на них задачи пока не в состоя-

нии. И объясняется это недостаточным уровнем их интеллектуализации, т.е. внедрения в их системы управления современных технологий искусственного интеллекта.

Целью работы является рассмотрение путей интеллектуализации процессов управления АНПА на примере решения трех задач, от которых во многом зависит эффективное применение АНПА, а именно:

1) управление АНПА, обеспечивающее достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия;

2) подводная навигация АНПА большой автономности, обеспечивающая выполнение

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

миссии на больших удалениях от пункта базирования;

3) сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

Интеллектуализация решения перечисленных задач предполагает использование такой технологии искусственного интеллекта, как интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений [9].

По каждой задаче в работе формулируются основные проблемные вопросы и намечаются пути их решения.

Управление АНПА

Управление АНПА реализуется ее системой управления (СУ), назначением которой является максимально точное выполнение маршрутного задания (МЗ), загруженного в ее память до начала миссии. МЗ представляет собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам, точное и своевременное выполнение которых позволит достичь цели миссии [10]. Для разработки МЗ созданы специальные языки и инструментарий [11].

Выполнение МЗ АНПА под управлением СУ больших трудностей не вызывало бы, если бы не препятствующие обстоятельства. Опыт применения АНПА показывает, что эти обстоятельства сопутствуют практически каждой миссии, и обусловлены они как внешними, так и внутренними факторами. К внешним факторам относятся:

- появление подводных объектов, столкновение с которыми нужно избежать;
- обнаружение неподвижных препятствий (подводных хребтов и др.), не нанесенных на навигационную карту, которые нужно обойти;
- непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, вызывающее необходимость изменять параметры движения АНПА;
- изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

Большинство из перечисленных факторов приводит к дополнительным временным затратам и дополнительному расходу запаса электроэнергии и, в конечном счете, к необходимости корректировки МЗ.

Ситуация еще более усложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами, препятствующими выполнению МЗ, являются неисправности аппаратной части АНПА и не восстанавливаемые сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки МЗ, а в ряде случаев и к прекращению миссии.

Парирование перечисленных негативных факторов является нетривиальной задачей даже для человека, поскольку для принятия в сложившейся ситуации эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии, нужно учесть как возникшие негативные факторы, так и ограничения по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной навигации, дальности гидроакустической связи. Для решения этой задачи системой управления АНПА она должна реализовывать сложные адаптивные алгоритмы, базирующиеся на технологиях искусственного интеллекта. И здесь возникает еще одна проблема. Формализованных методик синтеза подобных алгоритмов на сегодняшний день не существует. Есть только общие рекомендации по принципам их построения [12]. Такие алгоритмы во многом являются эвристическими, что переносит трудности с их разработки на их практическую отработку. А длительная отработка не предусмотрена действующей в России нормативной базой, регламентирующей разработку по госконтрактам сложной техники.

СУ АНПА относится к системам управления наивысшей сложности, что обусловлено необходимостью управлять в реальном времени большим числом разнородных технических средств и при этом функционировать в полностью автоматическом режиме в непрерывно изменяющейся внешней нередко агрессивной среде при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления.

Известно [13, 14], что построить такую СУ как централизованную (мультиобъектную), в которой СУ управляет всеми действиями всех технических средств АНПА, ввиду высокой сложности весьма затруднительно.

Для построения СУ АНПА в наибольшей степени подходит децентрализованная мультиагентная структура (рис. 1).

При такой структуре каждая система АНПА является самостоятельным независимым интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Управление движением АНПА и выполнением других функций осуществляется путем взаимодействия на основе равноправ-



Рис. 1. Структурная схема СУ АНПА
Fig. 1. Structural diagram of AUV control system

ного общения всех систем-агентов. Для того чтобы это взаимодействие имело целенаправленный характер, предусмотрен специальный агент-диспетчер, организующий выполнение сценария миссии, описанного в МЗ [10].

С учетом сказанного основными путями решения проблемы создания эффективной СУ АНПА являются:

- разработка адаптивных алгоритмов, позволяющих управлять системами АНПА и АНПА в целом в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия с учетом ограничений по запасу электроэнергии, скорости хода, точности автономной подводной навигации, дальности гидроакустической связи;
- разработка рациональных алгоритмов распределения энергоресурсов по системам АНПА в соответствии со сложившейся обстановкой;
- разработка алгоритмов сохранения функциональной устойчивости АНПА при частичной неисправности технических средств;
- создание моделирующих комплексов, позволяющих отрабатывать СУ, в том числе в нештатных ситуациях, а также верифицировать маршрутное задание АНПА перед загрузкой его в СУ;
- совершенствование нормативной базы, с тем чтобы в необходимых случаях предусматривать длительный этап натурной отработки создаваемых робототехнических средств.

Подводная навигация АНПА большой автономности

Одной из важных миссий, которые планируется возложить на АНПА, является выполнение задач в труднодоступных районах (в частности подо льдом) на больших удалениях от базы. Для выполнения этих миссий уже сейчас создаются АНПА большой автономности (АНПА БА). Одним из необходимых условий эффективного решения задач на больших удалениях от базы является высокоточная навигация АНПА БА на всем протяжении маршрута.

Основой навигации АНПА БА остается счисление пути с использованием данных бортового курсоуказателя либо бесплатформенной инерциальной навигационной системы и абсолютного (гидроакустического) либо относительного (электромагнитного) лага [15, 16]. Однако,

учитывая жесткие требования к габаритным размерам и энергопотреблению этих приборов для их размещения на АНПА, они имеют ограниченные характеристики как по точности выработки курса, так и по глубине под килем, при которой возможно измерение скорости абсолютным лагом (как правило, не более 400 м). Из этого вытекает необходимость периодической коррекции координат АНПА путем осуществления обсервации.

На сегодняшний день разработано большое число методов определения координат (позиционирования) АНПА [15–23]. Все эти методы можно разделить на две группы:

- методы, не требующие предварительного навигационного оборудования планируемого маршрута АНПА;
- методы, предусматривающие предварительное навигационное оборудование планируемого маршрута АНПА.

Рассмотрим каждую группу методов.

Методы позиционирования АНПА, не требующие предварительного навигационного оборудования их планируемого маршрута

К этим методам относятся:

1. Позиционирование АНПА с использованием сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (ГСНС) [15, 16]. Достоинствами данного метода являются высокая точность позиционирования (единицы—десят-

ки метров) и возможность его использования в любой точке Мирового океана, а недостатком — необходимость всплытия АНПА в надводное положение и приема сигналов ГСНС, что занимает значительное время (особенно при всплытии с больших глубин), требует дополнительного расхода запаса электроэнергии, а также ведет к потере скрытности АНПА. Кроме того, возможность позиционирования АНПА по данным ГСНС зависит от состояния поверхности моря (при большом волнении прием сигналов ГСНС существенно затруднен). Также ввиду малой мощности излучения сигналы ГСНС обладают низкой помехозащищенностью и легко поддаются подавлению либо преднамеренному искажению.

2. Позиционирование с использованием сигналов радионавигационных систем (РНС) [17–19]. В зависимости от диапазона используемых частот РНС делятся на сверхдлинноволновые (СДВ), длинноволновые (ДВ), средневолновые (СВ). Достоинством РНС СДВ диапазона является большая дальность действия (до 13 000 км), а недостатком — низкая точность позиционирования (до 7600 м на предельной дальности). Достоинством РНС ДВ диапазона является сравнительно большая дальность действия (до 1500 км) и приемлемая точность позиционирования (до 150 м на предельной дальности). Достоинством РНС СВ диапазона является сравнительно большая дальность действия (до 1000 км) и высокая точность позиционирования (единицы метров).

К достоинствам РНС следует также отнести возможность позиционирования при определенных условиях при нахождении АНПА в приповерхностном слое воды без всплытия на поверхность, а также подо льдом.

Основным недостатком РНС, кроме необходимости всплытия АНПА в приповерхностный слой воды, является тот факт, что отечественными системами РНС охвачены весьма ограниченные области Мирового океана, включая и прибрежные моря России.

3. Позиционирование с использованием технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии [20–22]. Метод состоит (рис. 2) в установке у побережья нескольких ненаправленных гидроакустических излучателей, периодически излучающих сложные сигналы, содержащие информацию об условном номере излучателя, времени излучения и скорости распространения сигнала. АНПА, приняв сигнал каждого излучателя, с использованием извлеченной из него информации и зная координаты каждого излучателя, вычисляет время его распространения и дистанцию до излучателя.

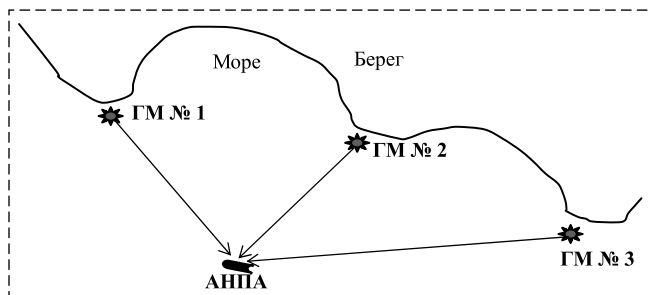


Рис.2. Иллюстрация позиционирования АНПА с использованием технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии

Fig. 2. Illustration of AUV positioning using high-precision underwater acoustic ranging technology

И далее, определив дистанцию до нескольких излучателей, методом длинной базы вычисляет собственные координаты. Ошибка позиционирования согласно работе [20] не превышает 250 м при удалении от излучателей до нескольких сотен километров.

Достоинством данного метода является возможность скрытного (без всплытия на поверхность) позиционирования всех подводных объектов (в том числе и АНПА), находящихся в районе площадью до 100 тыс. км², причем не периодически, а практически непрерывно, что позволяет АНПА не отклоняться от заложенного маршрута. Недостатком метода является необходимость развертывания подобных систем в районах, через которые пролегает маршрут АНПА, а также необходимость периодически уточнять скорость распространения акустических сигналов на трассе от каждого излучателя до АНПА.

На сегодняшний день подобных развернутых систем в мире нет, но их разработка активно ведется как в России [20], так и за рубежом [21].

Методы позиционирования АНПА, предусматривающие предварительное навигационное обустройство планируемого маршрута АНПА

К этим методам относятся:

1. Позиционирование с использованием донных маяков-ответчиков (ДМО), излучающих кодированные сигналы по запросу либо периодически [15,16]. По этим сигналам АНПА определяет текущую дистанцию до каждого ДМО и далее одним из методов вычисляет собственные координаты относительно ДМО. Точность позиционирования АНПА в зависимости от числа используемых ДМО (от одного и более) составляет единицы—десятки метров.

Достоинством данного метода является возможность осуществления позиционирования

без изменения глубины хода АНПА, а к недостаткам можно отнести:

- необходимость предварительной установки ДМО вдоль маршрута АНПА, что является весьма затратной процедурой;
- ограничения по глубине моря в месте установки ДМО;
- ограничения по времени функционирования ДМО.

2. Позиционирование с использованием естественных геофизических полей (батиметрического, гравитационного и магнитного) [22]. Данный метод состоит в измерении текущих значений пространственных аномалий этих полей и их сопоставлении с помощью экстремально-корреляционных методов с предварительно измеренными аномалиями, привязанными к географическим координатам. Точность позиционирования данным методом составляет сотни метров—единицы километров.

Достоинством данного метода является возможность скрытного позиционирования АНПА, а недостатками — необходимость наличия:

- существенных аномалий используемых естественных геофизических полей в районе плавания;
- заранее составленных подробных карт этих аномалий;
- аппаратуры, позволяющей фиксировать аномалии с необходимой точностью.

3. Позиционирование с использованием искусственных навигационных полей [16]. Данный метод идеологически аналогичен методу позиционирования с использованием ДМО, за исключением того, что вместо активных гидроакустических маяков используются расставленные в известных точках вдоль маршрута движения АНПА донные пассивные подводные ориентиры (ППО). В качестве ППО могут также использоваться донные объекты значительных габаритных размеров (затонувшие корабли, самолеты, подводные скалы и т.п.). К ППО предъявляется основное требование — возможность их надежного обнаружения и распознавания гидролокатором АНПА. Точность позиционирования с использованием ППО составляет десятки—сотни метров.

Достоинством метода позиционирования с использованием искусственных навигационных полей является возможность позиционирования АНПА без всплытия на поверхность, а недостатками — необходимость предварительного оборудования маршрута и ограничения по глубине моря. При этом следует заметить, что на сегодняшний день идея данного метода не доведена до практической реализации.

4. Позиционирование АНПА с использованием радиогидроакустических буйев, называемых в зарубежной литературе GPS Intelligent Buoys или сокращенно GIBs [23]. Каждый буй по радиоканалу принимает сигналы СНС и транслирует их по гидроакустическому каналу. АНПА принимает эти сигналы и одновременно путем модемного обмена определяет расстояние до буя и его пеленг. Достоинствами данного метода является возможность высокоточного позиционирования АНПА без всплытия на поверхность, а недостатком — необходимость установки буйев вдоль маршрута АНПА. При этом, учитывая ограниченный заряд аккумулятора, буи приходится расставлять в процессе движения АНПА по маршруту.

Вариантом данного метода является оборудование подобным буюм АНПА. Тогда вместо всплытия АНПА всплывать на поверхность для получения сигналов ГСНС будет привязанной буй. В ряде случаев этот вариант может оказаться предпочтительным.

Из рассмотрения методов позиционирования АНПА можно сделать вывод, что применение каждого из них зависит от многих факторов, ввиду чего необходима разработка и внедрение в СУ АНПА адаптивных алгоритмов выбора метода обсервации в сложившихся условиях с учетом многообразия факторов.

Сетевая подводная связь

Известно, что применение АНПА наиболее эффективно при их групповом использовании [6—8]. Необходимым условием группового применения АНПА является их оборудование средствами сетевой подводной (гидроакустической) связи (СПС). Специфическими техническими требованиями к СПС (и одновременно проблемными вопросами ее реализации) являются [24—36]:

- обеспечение обмена данными одновременно между заранее непредсказуемым числом абонентов сети;
- высокоточное абсолютное либо относительное позиционирование абонентов в процессе обмена данными;
- обеспечение постоянной связности сети в сложных гидроакустических условиях путем создания оптимальных на текущий момент маршрутов передачи данных между каждой парой абонентов;
- ограничение массогабаритных характеристик и стоимости сетевого оборудования.

Наземным аналогом СПС является сетевая радиосвязь. Но если последняя достаточно хорошо развита, то первая только делает начальные шаги. Обусловлено это как более поздней практической востребованностью СПС, так и множеством фундаментальных физических факторов, затрудняющих развитие СПС. К этим факторам относятся: существенно ограниченная полоса частот, которая может использоваться на практике для передачи сигнала; большое время распространения гидроакустического сигнала по сравнению с радиосигналом; реверберация связанного сигнала большой интенсивности и длительности; образование протяженных зон тени и замирания связанного сигнала вследствие его многолучевого распространения; большие доплеровские искажения; быстрая изменчивость характеристик гидроакустической среды.

Для преодоления негативного влияния перечисленных факторов применительно к СПС разработаны методы и алгоритмы [24–36]:

- формирования и обработки связанного сигнала, обеспечивающие высокую помехоустойчивость передачи данных;
- управления доступом к среде с учетом специфики распространения гидроакустического сигнала;
- сетевой маршрутизации данных с учетом многолучевости и временной изменчивости среды распространения;
- транспорта данных в условиях длительных задержек в их доставке и разрывов связности сети.

Но проблема состоит в том, что эффективность применения всех без исключения разработанных методов зависит от текущих гидроакустических условий, конфигурации сети и ряда других факторов. Ввиду этого для эффективной реализации СПС СУ АНПА должна быть оснащена адаптивными алгоритмами выбора методов реализации СПС в сложившихся условиях. Разработка таких адаптивных алгоритмов, к тому же реализуемых без участия человека, представляет собой весьма нетривиальную задачу, поскольку, с одной стороны, они требуют учета большого числа факторов, а с другой стороны, они представляют собой решение многокритериальной задачи.

Заключение

Эффективное применение АНПА для исследования и освоения Мирового океана существенно зависит от способности их СУ при-

нимать верные решения в сложившейся обстановке, для чего система управления АНПА должна быть оснащена алгоритмами поддержки управленческих решений, базирующимися на технологиях искусственного интеллекта.

В работе рассмотрены пути интеллектуализации АНПА в обеспечение решения трех задач, от решения которых во многом зависит успешное применение АНПА. Этими задачами являются:

- 1) управление АНПА, обеспечивающее достижение цели миссии в условиях возникновения нештатных ситуаций, а также преднамеренного и непреднамеренного противодействия;
- 2) подводная навигация, обеспечивающая выполнение миссии на больших удалениях от пункта базирования;
- 3) сетевая подводная связь, обеспечивающая групповое применение АНПА.

Авторы благодарят И. Г. Архипову и В. Н. Полиенко за ценные советы в части методов радионавигации.

Список литературы

1. Агеев М. Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Инзарцев А. В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2 (4). С. 5–14.
3. Боженков Ю. А. Использование автономных обитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4, № 1. С. 4–68.
4. Millar G., Mackay L. Maneuvering Under the Ice // Sea Technology. 2015. Vol. 56, N. 4. P. 35–38.
5. Гизитдинова М. Р., Кузьмицкий М. А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3, № 1. С. 4–13.
6. Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Бочаров Л. Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. 304 с.
7. Белоусов И. Современные и перспективные обитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 5. С. 79–88.
8. Кузьмицкий М. А., Гизитдинова М. Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011, Т. 4, № 3. С. 37–48.
9. Указ Президента РФ № 490 от 10.10.2019 г.
10. Борейко А. А., Инзарцев А. В., Мамошин А. И., Павин А. М., Пашкевич И. В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (28). С. 23–31.
11. Butler H., Daly M., Doyle A., Gillies S., Hagen S., Schaub T. The GeoJSON Format, RFC 7946. The Internet Engineering Task Force. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7946>.
12. Procedural Reasoning System User's Guide. A Manual for Version 2.0. SRI International. 2001. URL: <http://www.ai.sri.com/~prs/prs-manual.pdf>.
13. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.

14. **Ржевский Г. А., Скобелев П. О.** Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
15. **Kinsey J. C., Eustice R. M., Whitcomb L. L.** A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and new Challenges // IFAC Conference on maneuvering and control of marine craft. 2006. Lisbon, Portugal.
16. **Кебкал К. Г., Машошин А. И.** Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 3 (94). С. 115—130.
17. **Малеев П. И.** Проблемы средств навигации АНПА и возможные пути их решения // Навигация и гидрография. 2015. № 39. С. 7—11.
18. **Каретников В. В., Миляков Д. Ф., Бряннова Я. Д.** Навигационное обеспечение Северного морского пути: функциональные дополнения ГНСС // Морская радиоэлектроника. 2018. № 2 (64). С. 8—11.
19. **Каретников В. В., Миляков Д. Ф., Бряннова Я. Д., Сикарев А. А.** Навигационное обеспечение Северного морского пути: проблемы и перспективы развития // Морская радиоэлектроника. 2017. № 4 (62). С. 18—22.
20. **Моргунюв Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Голов А. А.** Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 2. С. 191—196.
21. **DARPA** Broad Agency Announcement Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON). Strategic Technology Office, DARPA-BAA-15-30.
22. **Степанов О. А., Торопов А. Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям // Гироскопия и навигация. 2015. № 3. С. 102—125; 2015. № 4. С. 147—159.
23. **Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C.** Use of GLBs in AUVs for underwater archaeology // Sea Technology. 2003. Vol. 44, N. 12. P. 22—27.
24. **Кебкал К. Г., Машошин А. И., Мороз Н. В.** Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 2 (105). С. 106—135.
25. **Domingo M. C.** An overview of the internet of underwater things // Journal of Network and Computer Applications. 2012. Vol. 35, N. 6. P. 1879—1890.
26. **Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M.** Underwater sensor networks: Applications, advances, and challenges // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2012. Vol. 370, N. 1958. P. 158—175.
27. **Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T.** Underwater acoustic sensor networks: research challenges // Ad Hoc Networks. 2005. Vol. 3, N. 3. P. 257—279.
28. **Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S.** Throughput-efficient super-TDMA MAC transmission schedules in ad hoc linear underwater acoustic networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017. Vol. 42. P. 156—174.
29. **Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S.** Throughput-Maximizing Transmission Schedules for Underwater Acoustic Multihop Grid Networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2015. Vol. 40. P. 853—863.
30. **Diamant R., Lampe L.** Spatial Reuse Time-Division Multiple Access for Broadcast Ad Hoc Underwater Acoustic Communication Networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2011. Vol. 36, N. 2. P. 172—185.
31. **Kredo K., Djukic P., Mohapatra P.** STUMP: Exploiting Position Diversity in the Staggered TDMA Underwater MAC Protocol // Proc. of IEEE INFOCOM. 2009.
32. **Chirdchoo N., Soh W. S., Chua K. C.** MU-Sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks // Proc. of the ACM International Workshop on Underwater Networks. 2008.
33. **Knappe S.** et al. A microfabricated atomic clock // Applied Physics Letters. 2004. Vol. 85, N. 9. P. 1460—1462.
34. **Gardner T., Collins J. A.** Advancements in high-performance timing for long term underwater experiments: A comparison of chip scale atomic clocks to traditional microprocessor-compensated crystal oscillators // Proc. IEEE Oceans Conf. 2011.
35. **Кебкал К. Г.** et al. Underwater acoustic modems with integrated atomic clocks for one-way travel-time underwater vehicle positioning // Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE). 2017.

Problematic Issues of Intellectualizing the Control System of Autonomous Underwater Vehicles

A. I. Mashoshin, aimashoshin@mail.ru, **I. V. Pashkevich**, iv@bk.ru,

JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Mashoshin A. I., D. Tech. Sc., Chief of research center, JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: aimashoshin@mail.ru

Accepted on July 07, 2020

Abstract

The paper considers ways of intellectualizing the control processes of autonomous underwater vehicles (AUVs) by the example of solving three problems, on which the successful use of AUVs largely depends. The first problem is to create an AUV control system (CS), which ensures the achievement of the mission's objective in the event of emergencies caused by both external and internal reasons, as well as deliberate and unintentional counteraction. It is shown that for the construction of the AUV's CS the decentralized multi-agent structure is most suitable, in which each AUV system is an independent intellectual agent with its own control system. The control system must be equipped with a set of adaptive algorithms that ensure: control of AUV in the event of emergency situations, taking into account restrictions on the supply of electric energy, speed, accuracy of autonomous underwater navigation, range of hydro-acoustic communication; rational distribution of energy resources by AUV systems in accordance with the current situation; maintaining the functional stability of the AUV with a partial malfunction of technical means. The second problem is to create an underwater navigation system that ensures the accomplishment of AUV missions at great distances from the base point. Since AUV navigation using only on-board means (inertial navigation system and lag) does not provide the necessary accuracy, a prerequisite for AUV navigation over long distances is to conduct an observation using external sources, the choice of which in the circumstances is a non-trivial task. The third problem is to create a network underwater commu-

nication system (NUCS), which provides for the group application of AUVs. The ground analogue of NUCS is network radio communication. But if the latter is fairly well developed, then the former only takes the initial steps. This is due to both the later practical relevance of NUCS, and many fundamental physical factors that impede the development of NUCS, which include: a substantially limited frequency band that can be used in practice for signal transmission; a large propagation time of the hydroacoustic signal compared to the radio signal; the formation of extended shadow zones and fading of the connected signal due to its multipath propagation; significant Doppler distortions, fast variability of the characteristics of the hydroacoustic medium.

Keywords: autonomous underwater vehicle, control system, underwater navigation, network underwater communication

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-08-00253).

For citation:

Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. Problematic Issues of Intellectualizing the Control System of Autonomous Underwater Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 622–629.

DOI 10/17587/mau.21.622–629

References

1. Ageev M. D., et al. Autonomous underwater robots. Systems and technologies, Moscow, Nauka, 2005, 400 p. (in Russian).
2. Inzartsev A. V., et al. The use of an autonomous underwater vehicle for scientific research in the Arctic, *Underwater Research and Robotics*, 2007, no. 2 (4), pp. 5–14 (in Russian).
3. Bozhenov Yu. A. The use of autonomous underwater vehicles for the study of the Arctic and Antarctic, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 4–68 (in Russian).
4. Millar G., Mackay L. Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 35–38.
5. Gizitdinova M. R., Kuzmitsky M. A. Mobile underwater robots in modern oceanography and hydrophysics, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 4–13 (in Russian).
6. Illarionov G. Yu., Sidenko K. S., Bocharov L. Yu. A threat from the depths: XXI century, Khabarovsk, State Unitary Enterprise "Khabarovsk Regional Printing House", 2011, 304 p. (in Russian).
7. Belousov I. Modern and perspective autonomous underwater vehicles of the US Navy, *Foreign Military Review*, 2013, no. 5, pp. 79–88 (in Russian).
8. Kuzmitsky M. A., Gizitdinova M. R. Mobile underwater robots in solving the problems of the Navy: Modern technologies and prospects, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 37–48 (in Russian).
9. Decree of the President of the Russian Federation No. 490 of 10.10.2019 (in Russian).
10. Boreyko A. A. et al. AUV control system of great autonomy based on a multi-agent approach, *Underwater Research and Robotics*, 2019, no. 2(28), pp. 23–31 (in Russian).
11. Butler H., et al. The GeoJSON Format, RFC 7946. The Internet Engineering Task Force, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7946>.
12. Procedural Reasoning System User's Guide. A Manual for Version 2.0. SRI International, 2001, available at: <http://www.ai.sri.com/~prs/prs-manual.pdf>.
13. Gorodetsky V. I., Grushinsky M. S., Khabalov A. V. Multi-agent systems (review), *Artificial Intelligence News*, 1998, no. 2, pp. 64–116 (in Russian).
14. Rzhnevsky G. A., Skobelev P. O. How to manage complex systems? Multi-agent technologies for creating intelligent enterprise management systems, Samara, Ofort, 2015, 290 p. (in Russian).
15. Kinsey J. C., Eustice R. M., Whitcomb L. L. A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and new Challenges, *IFAC Conference on maneuvering and control of marine craft*. 2006, Lisbon. Portugal.
16. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods, *Gyroscopy and Navigation*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 80–89 (in Russian).
17. Maleev P. I. Problems of AUV navigation instruments and possible solutions, *Navigation and hydrography*, 2015, no. 39, pp. 7–11.
18. Karetnikov V. V., Milyakov D. F., Bryanova Y. D. Navigation support of the Northern Sea Route: GNSS functional additions, *Marine Radioelectronics*, 2018, no. 2 (64), pp. 8–11 (in Russian).
19. Karetnikov V. V. et al. Navigation support of the Northern Sea Route: problems and development prospects, *Marine Radioelectronics*, 2017, no. 4(62), pp. 18–22 (in Russian).
20. Morgunov Yu. N. et al. Experimental testing of high-precision underwater acoustic ranging technology, *Acoustic Journal*, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 191–196 (in Russian).
21. DARPA Broad Agency Announcement Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON), Strategic Technology Office, DARPA-BAA-15-30.
22. Stepanov O. A., Toropov A. B. Nonlinear filtering methods in the task of navigating geophysical fields, *Gyroscopy and Navigation*, 2015, no. 3, pp. 102–125; 2015, no. 4, pp. 147–159 (in Russian).
23. Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C. Use of GIBs in AUVs for underwater archaeology, *Sea Technology*, 2003, vol. 44, no. 12, pp. 22–27.
24. Kebkal K. G., Mashoshin A. I., Morozs N. V. Solutions for Underwater Communication and Positioning Network Development, *Gyroscopy and Navigation*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 161–179 (in Russian).
25. Domingo M. C. An overview of the internet of underwater things, *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, vol. 35, no. 6, pp. 1879–1890.
26. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater sensor networks: Applications, advances, and challenges, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, vol. 370, no. 1958, pp. 158–175.
27. Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges, *Ad Hoc Networks*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 257–279.
28. Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S. Throughput-efficient super-TDMA MAC transmission schedules in ad hoc linear underwater acoustic networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, vol. 42, pp. 156–174.
29. Lmai S., Chitre M., Laot C., Houcke S. Throughput-Maximizing Transmission Schedules for Underwater Acoustic Multihop Grid Networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, vol. 40, pp. 853–863.
30. Diamant R., Lampe L. Spatial Reuse Time-Division Multiple Access for Broadcast Ad Hoc Underwater Acoustic Communication Networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 172–185.
31. Kreda K., Djukic P., Mohapatra P. STUMP: Exploiting Position Diversity in the Staggered TDMA Underwater MAC Protocol, *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2009.
32. Chirdchoo N., Soh W. S., Chua K. C. MU-Sync: A time synchronization protocol for underwater mobile networks, *Proc. of the ACM International Workshop on Underwater Networks*, 2008.
33. Knappe S. et al. A microfabricated atomic clock, *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 9, pp. 1460–1462.
34. Gardner T., Collins J. A. Advancements in high-performance timing for long term underwater experiments: A comparison of chip scale atomic clocks to traditional microprocessor-compensated crystal oscillators, *Proc. IEEE Oceans Conf.*, 2011.
35. Kebkal K. G. et al. Underwater acoustic modems with integrated atomic clocks for one-way travel-time underwater vehicle positioning, *Proc. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE)*, 2017.

Г. Р. Галимова, аспирант¹, инженер-конструктор², gulshat.galimova.1995@mail.ru,
В. Г. Волков, аспирант¹, главный специалист², vgvolkov93@mail.ru,
И. З. Ахметзянов, канд. техн. наук, доц.¹, главный специалист², Akhmetzyanov.IZ@kamaz.ru,
¹ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет", г. Казань,
²Научно-технический центр ПАО "КАМАЗ", г. Набережные Челны

Упреждающее многосвязное управление движением автопоезда по криволинейной траектории

Рассматривается задача движения автопоезда по криволинейной траектории с оптимальной скоростью. Для решения задачи предлагается алгоритм управления, основанный на стратегии многосвязного упреждающего управления. Упреждающее управление предполагает вычисление последовательности управляющих воздействий путем решения задачи оптимального управления на фиксированном конечном горизонте для текущего состояния нестационарной нелинейной системы. В качестве управляющих воздействий используются угол поворота управляемых колес автомобиля-тягача и ускорение автопоезда. Продольная и поперечная динамика описывается неявной нелинейной математической моделью в непрерывном времени. Построение дискретной линейной нестационарной модели для прогнозирования, описывающей динамику отклонения системы от опорной траектории, основывается на дискретизации исходной системы методом Эйлера и вычислении явных аналитических выражений для ее якобиана с помощью пакета символьных вычислений системы MATLAB. Опорная траектория и соответствующие опорные значения вектора состояний вычисляются с помощью известных геометрических методов, использующих информацию о координатах траектории и ее кривизне. При вычислении опорной скорости учитываются ее ограничения по заносу и опрокидыванию. Для тестирования предлагаемого алгоритма разработана компьютерная модель в среде имитационного моделирования Simulink. Представлены результаты тестирования движения автопоезда по заданной траектории при различных значениях опорной скорости. Показано, что алгоритм обеспечивает достаточно высокую точность следования опорной траектории, поддержание скорости, близкой к ее опорному значению, и малые значения угла складывания при значениях опорной скорости не более 18 м/с и радиусах кривизны поворотов не менее 250 м. Разработанный алгоритм в дальнейшем может быть использован для разработки систем активной помощи водителю и автономных автопоездов.

Ключевые слова: упреждающее управление, многосвязное управление, продольная динамика автомобиля, поперечная динамика автомобиля, следование траектории, автопоезд

Введение

В настоящее время автопоезда активно применяются в коммерческих грузоперевозках, что связано с их высокой экономической эффективностью. Согласно экспертным оценкам применение автопоездов позволяет снизить себестоимость транспортировки грузов на средних и больших дистанциях на 30 % [1]. Однако управление автопоездом является достаточно сложной задачей, поскольку требует учета динамики как автомобиля-тягача, так и полуприцепа, а также их ограниченной маневренности. В связи с данным обстоятельством весьма актуальной является проблема разработки для них систем активной помощи водителю и полностью автономных автопоездов.

Создание автономных транспортных средств (АТС) [2] является одним из ключевых направлений исследований в промышленности и науке. Как правило, в архитектуре АТС выделяют системы, отвечающие за восприятие, локализацию, планирование пути и управление движением [3]. В частности, система управле-

ния движением должна обеспечивать следование ТС траектории, сгенерированной системой планирования пути, с оптимальной скоростью. Для этого необходимо обеспечить управление продольным и боковым движением ТС.

Для управления продольным движением ТС часто используются системы "круиз-контроль" (КК) и "адаптивный круиз-контроль" (АКК). Обзор этапов развития систем АКК представлен, например, в работе [4]. В работе [5] описана реализация АКК на основе метода скользящего режима и приведено экспериментальное подтверждение его эффективности. Нелинейные методы управления, например, второй (прямой) метод Ляпунова (см., например, работу [6]) и адаптивное управление (см., например, работу [7]), также применяются для управления продольным движением ТС.

Обзор методов управления боковым движением ТС и их реализаций представлен в работе [8]. Среди них можно отметить метод Стэнли [9] и линейно-квадратичное управление. Для повышения эффективности управления боковым движением могут использоваться и другие

подходы. Так, в работе [10] управление осуществляется с помощью нечеткого регулятора, для настройки которого применяются генетические алгоритмы. Основным недостатком такого подхода является необходимость создания репрезентативного набора данных для обучения регулятора. В работе [11] также рассматривается система рулевого управления, основанная на нечеткой логике. Разработанный нечеткий регулятор сравнивается с упреждающим, отмечается, что его ошибка управления в меньшей степени зависит от скорости движения автомобиля. Однако следует отметить, что одним из основных недостатков данного подхода является необходимость создавать базы правил, основанные на экспертных оценках.

Во всех приведенных выше исследованиях задачи управления продольным и боковым движением ТС рассматривались независимо друг от друга, иными словами, применялась развязанная стратегия управления. В многосвязной стратегии управления они решаются совместно, что позволяет учитывать их взаимовлияние, но увеличивает вычислительную сложность получаемого алгоритма. В литературе предложены различные методы многосвязного управления. Например, в работе [12] было предложено решение, основанное на рекурсивном синтезе (Backstepping). В статье [13] описано решение, основанное на теории управляемых нелинейных систем (Flat systems), недостатком которого является сложность идентификации параметров при быстром изменении динамики ТС.

В последнее время получили распространение системы упреждающего управления (Model Predictive Control, MPC), которые могут использоваться как в развязанных (например, в качестве регулятора бокового движения ТС [14–16]), так и в многосвязных системах управления [17]. В MPC последовательность управляющих воздействий вычисляется путем решения задачи оптимального управления на фиксированном конечном горизонте для текущего состояния нестационарной нелинейной системы [18]. Благодаря этому MPC хорошо подходит для управления движением автопоезда, которое описывается достаточно сложными и существенно нелинейными законами.

Таким образом, целью данной работы является разработка упреждающего многосвязного алгоритма управления продольным и боковым движением автопоезда по криволинейной траектории.

Постановка задачи

Управление движением ТС является сложной задачей, которая требует анализа взаимовлияния его продольной и поперечной динамики. Рассматривая задачу управления движением автопоезда, необходимо отметить, что она имеет дополнительные сложности, связанные с наличием полуприцепа. Известно [19], что при прохождении поворотов автопоезда, как правило, обладают значительно большей шириной динамического коридора по сравнению с одиночными автомобилями тех же габаритных размеров. Также вследствие действия внешних возмущений могут возникать существенные поперечные угловые колебания (так называемое "виляние") полуприцепа, что дополнительно увеличивает эту ширину. Более того, при движении на больших скоростях вышеописанные колебания могут оказаться неустраняемыми посредством изменения угла поворота управляемых колес без снижения скорости. Кроме того, следует отметить, что центр масс (ЦМ) автопоезда, как правило, расположен выше, чем у одиночных ТС, что повышает риск его опрокидывания при прохождении поворотов. Все это не только накладывает существенные ограничения на минимальный допустимый радиус поворотов, но и требует более точного планирования траектории и скорости движения при их прохождении.

Для описания движения автопоезда по криволинейной траектории в данной работе используется нелинейная математическая модель, сформированная с помощью уравнений Лагранжа второго рода. В качестве обобщенных координат используются положение седельно-сцепного устройства (ССУ) автопоезда, а также курсовые углы автомобиля-тягача и полуприцепа. Подробный вывод приведенной ниже системы уравнений представлен в работе [20]. При ее выводе были сделаны следующие основные предположения: автопоезд движется по идеально ровной опорной поверхности (совершает плоское движение); ССУ представляет собой идеальное цилиндрическое шарнирное соединение; угловыми перемещениями корпусов тягача и полуприцепа относительно продольной и поперечной осей симметрии можно пренебречь; углы увода и углы поворота колес всех осей автопоезда попарно равны между собой. Таким образом, предполагается, что основное влияние на динамику автопоезда оказывают силы реакции, возникающие в пятнах контак-

тов колес с опорной поверхностью. Отметим, что в целях дальнейшего упрощения модели, предложенной в работе [20], отдельные оси полуприцепа и действующие на них силы реакции заменены одной условной осью и равнодействующими силами реакций.

Используемая модель может быть записана в виде неявного матричного нелинейного дифференциального уравнения

$$\begin{bmatrix} \sigma(m_1 + m_2) & 0 & 0 & -m_2 d_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 + m_2 & m_1 d_1 & -m_2 d_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 d_1 & J_1 + m_1 d_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 d_2 & 0 & J_2 + m_2 d_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{\omega}_{z1} \\ \dot{\omega}_{z2} \\ \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \\ F_8 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} F_1 &= (m_1 + m_2)v_y \omega_{z1} + m_1 d_1 \omega_{z1}^2 - \\ &- m_2 d_2 \omega_{z2}^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - F_w - R_{x1} \cos \delta + R_{x2} - \\ &- R_{y1} \sin \delta - R_{x3} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + R_{x3} \sin(\varphi_1 - \varphi_2); \\ F_2 &= -\sigma(m_1 + m_2)v_x \omega_{z1} + m_2 \omega_{z2}^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - \\ &- R_{x1} \sin \delta + R_{y1} \cos \delta + R_{y2} + R_{x3} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \\ &+ R_{x3} \cos(\varphi_1 - \varphi_2); \\ F_3 &= (\sigma - 1)(m_1 + m_2)v_x v_y - m_1 d_1 v_x \omega_{z1} - \\ &- R_{x1}(d_1 + l_1) \sin \delta + R_{y1}(d_1 + l_1) \cos \delta + \\ &+ R_{y2}(d_1 - l_2); \\ F_4 &= m_2 d_2 v_x \omega_{z1} - R_{y3}(d_2 + l_3); \\ F_5 &= v_x \cos \varphi_1 - v_y \sin \varphi_1; \\ F_6 &= v_x \sin \varphi_1 + v_y \cos \varphi_1; \\ F_7 &= \omega_{z1}; F_8 = \omega_{z2}. \end{aligned}$$

Здесь $[v_x \ v_y \ \omega_{z1} \ \omega_{z2} \ X \ Y \ \varphi_1 \ \varphi_2]^T$ — вектор состояния системы; v_x, v_y — продольная и боковая скорости автомобиля-тягача; $\varphi_1, \varphi_2, \omega_{z1}, \omega_{z2}$ — курсовые углы автомобиля-тягача и полуприцепа и их скорости изменения; X, Y — координаты ССУ; δ — угол поворота управляемых колес; σ — коэффициент учета вращающихся масс; m_1, m_2, J_1, J_2 — массы и моменты инерции автомобиля-тягача и полуприцепа, соответственно; d_1, d_2 — расстояния от ССУ до ЦМ автомобиля-тягача и полуприцепа; F_w — сила аэродинамического сопротивления; R_{xj} и R_{yj} — продольные и боковые составляющие сил реакции для j -й оси

автопоезда; l_j — расстояние от j -й оси до ЦМ соответствующего звена автопоезда.

Продольные составляющие сил реакции R_{xj} описываются следующими выражениями:

$$\begin{cases} R_{x1} = f_1 N_1; \\ R_{x2} = \sigma(m_1 + m_2)a - f_2 N_2; \\ R_{x3} = f_3 N_3, \end{cases} \quad (2)$$

где f_j — коэффициенты сопротивления качению колес j -й оси автопоезда; N_j — нормальная составляющая силы реакции дороги, действующая на колеса j -й оси автопоезда. Отметим, что a в соотношениях (2) представляет собой

желаемое продольное ускорение ТС без учета действующих на него сил сопротивления и не сводится к простому дифференцированию по времени v_x , а $\sigma(m_1 + m_2)a$ соответствует вызывающей его силе тяги. При этом предполагается, что данное ускорение обеспечивается системой управления тяговой динамикой ТС более низкого уровня посредством формирования соответствующих запросов крутящего и тормозного моментов. Такой подход имеет место при разработке алгоритмов управления продольным движением ТС [21], поскольку позволяет не учитывать сложности, связанные с нелинейностью и нестационарностью процессов выработки и преобразования крутящего момента.

Поперечные составляющие сил реакции R_{yj} при малых значениях углов увода определяются по следующим формулам:

$$R_{yj} = k_{\alpha j} \alpha_j, \quad (3)$$

где $k_{\alpha j}$ и α_j — коэффициент сопротивления уводу и угол увода колес j -й оси автопоезда.

При этом углы увода α_j , требуемые для расчета сил реакции R_{yj} по формулам (3), вычисляются из известных кинематических соотношений:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \delta - \arctg \frac{v_y + \omega_{z1} l_1}{v_x}; \\ \alpha_2 = \arctg \frac{\omega_{z1} l_2 - v_y}{v_x}; \\ \alpha_3 = \arctg \frac{\omega_{z2} l_3 - v_x \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - v_y \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{v_x \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - v_y \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}. \end{cases} \quad (4)$$

Для вычисления силы аэродинамического сопротивления F_w берется стандартное соотношение

$$F_w = k_w A v_x^2, \quad (5)$$

где k_w — коэффициент сопротивления воздуха; A — площадь лобового сечения.

Таким образом, при решении задачи управления автопоездом, который описывается моделью (1)–(5), целью является вычисление желаемого продольного ускорения a и угла поворота управляемых колес δ , которые позволяют ему следовать заданной траектории движения.

Метод упреждающего управления

На сегодняшний день имеется большое число методов, разработанных для управления движением одиночных ТС. Однако без модификаций данные методы могут не обеспечивать требуемое качество управления движением автопоезда, поскольку он является более сложным объектом управления, который имеет большее число степеней свободы, большую многосвязность и более сильные ограничения на управляющие воздействия. Одним из подходов, который успешно применяется при решении задач управления движением одиночных ТС и может быть распространен на случай управления автопоездом благодаря возможности учета вышеописанных факторов, является многосвязное упреждающее управление [22].

Упреждающее управление основано на решении на каждой итерации алгоритма задачи оптимизации с ограничениями на конечном горизонте прогнозирования. Горизонт прогнозирования представляет собой временной интервал, на котором вычисляются будущие изменения состояния объекта управления на основе его математической модели. Решением задачи на каждой итерации является последовательность оптимальных управляющих воздействий для всех точек горизонта прогнозирования. Первый элемент данной последовательности подается на объект управления в качестве управляющего воздействия, после чего осуществляется перемещение горизонта прогнозирования на один шаг вперед и происходит переход на следующую итерацию.

Введем следующие обозначения:

$$\tilde{\mathbf{z}}_i = \mathbf{z}_i - \mathbf{z}_i^{ref}, \quad \tilde{\mathbf{u}}_i = \mathbf{u}_i - \mathbf{u}_i^{ref},$$

где $\tilde{\mathbf{z}}_i$ и $\tilde{\mathbf{u}}_i$ — отклонения от опорного состояния и опорных управляющих воздействий; $\mathbf{z}_i$ и $\mathbf{u}_i$ — спрогнозированные состояния объекта управления и управляющие воздействия, соответственно. Индексом $(\cdot)^{ref}$ здесь и далее обозначены опорные значения, индексом $(\cdot)_i$ — номера точек горизонта прогнозирования.

Тогда целевая функция задачи упреждающего управления может быть представлена в следующем виде:

$$\min_{\mathbf{u}_i} \sum_{i=1}^{H_p} \tilde{\mathbf{z}}_i^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{z}}_i + \sum_{i=0}^{H_c} \tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{R} \tilde{\mathbf{u}}_i,$$

где H_p — горизонт прогнозирования; H_c — горизонт управления; $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ — матрицы весовых коэффициентов. Стоит отметить, что в стандартной постановке задачи упреждающего управления, как правило, берется $H_c = H_p$, однако на практике для снижения вычислительной сложности достаточно часто принимается $H_c < H_p$.

Важным преимуществом упреждающего управления является возможность накладывать ограничения на состояния и управляющие воздействия:

$$\mathbf{C} \mathbf{z}_i + \mathbf{D} \mathbf{u}_i \leq \mathbf{b},$$

где $\mathbf{C}$ и $\mathbf{D}$ — матрицы для формирования ограничений; $\mathbf{b}$ — вектор ограничений на состояния и управляющие воздействия.

Для прогнозирования состояния объекта управления, как правило, используется модель в пространстве состояний. В целях повышения точности прогнозирования можно использовать нестационарную модель в пространстве состояний. В этом случае $\mathbf{z}_{i+1}$ будет вычисляться по формуле

$$\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{A}_i \mathbf{z}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i.$$

Таким образом, задача упреждающего управления движением автопоезда может быть сформулирована следующим образом:

$$\min_{\mathbf{u}_i} \sum_{i=1}^{H_p-1} \tilde{\mathbf{z}}_i^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{z}}_i + \sum_{i=0}^{H_c} \tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{R} \tilde{\mathbf{u}}_i, \quad (6)$$

при условиях

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_0 &= \mathbf{z}(0), \\ \tilde{\mathbf{z}}_{i+1} &= \mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{z}}_i + \mathbf{B}_i \tilde{\mathbf{u}}_i, \\ |\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i| &\leq \Delta \mathbf{u}, \\ |\mathbf{u}_i| &\leq \mathbf{u}_{\max}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{z} = [v_x \ v_y \ \omega_{z1} \ \omega_{z2} \ X \ Y \ \varphi_1 \ \varphi_2]^T$; $\mathbf{u} = [a \ \delta]^T$; $\Delta \mathbf{u}$, $\mathbf{u}_{\max}$ — векторы максимальных изменений и максимальных значений управляющих воздействий, соответственно.

При такой формулировке ключевую роль играет вычисление векторов опорных состояний и управляющих воздействий, а также матриц нестационарной модели в пространстве состояний, используемой для прогнозирования.

Вычисление вектора опорных состояний системы осуществляется на основе координат (X, Y) и кривизны траектории k . На каждом шаге выбираются H_p опорных точек на траектории, генерируемой системой планирования пути. В качестве первой опорной точки ($i = 1$) выбирается ближайшая точка на траектории. Последующие $H_p - 1$ точек выбираются из условия

$$\min_i \{ \sqrt{[X^{ref}(i) - X^{ref}(i-1)]^2 + [Y^{ref}(i) - Y^{ref}(i-1)]^2} - S \}, \quad (7)$$

где S — расстояние между опорными точками, вычисляемое по формуле

$$S = vT_s,$$

где v — текущая скорость автопоезда; T_s — шаг выборки. Для простоты обозначений в этом разделе номера опорных точек указываются в скобках. Таким образом, $X^{ref}(i)$ и $Y^{ref}(i)$ обозначают опорные координаты автопоезда в i -й точке траектории.

Опорный курсовой угол автомобиля-тягача $\varphi_1^{ref}(i)$ вычисляется как тангенс угла наклона касательной в ней. Опорным значением для курсового угла полуприцепа $\varphi_2^{ref}(i)$ будем считать опорный курсовой угол автомобиля-тягача, иными словами, будем предполагать, что желаемый угол складывания $\Delta\varphi^{ref}(i) = \varphi_1^{ref}(i) - \varphi_2^{ref}(i)$ равен нулю.

Элементы векторов опорных угловых скоростей автомобиля-тягача ω_{z1}^{ref} и полуприцепа ω_{z2}^{ref} вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \omega_{z1}^{ref}(i) &= (\varphi_1^{ref}(i+1) - \varphi_1^{ref}(i))/T_s; \\ \omega_{z2}^{ref}(i) &= (\varphi_2^{ref}(i+1) - \varphi_2^{ref}(i))/T_s, \end{aligned} \quad (8)$$

где $i = \overline{1, H_p - 1}$. Значения $\omega_{z1}^{ref}(H_p)$ и $\omega_{z2}^{ref}(H_p)$ принимаются равными нулю.

Вычисление опорной скорости выполняется в два этапа. На первом этапе определяется максимально допустимая безопасная скорость $v_s(i)$ в каждой точке горизонта прогнозирования.

Максимальной допустимой безопасной скоростью будем считать 90 % от наименьшей из критических скоростей по заносу $v_d(i)$ и по опрокидыванию $v_r(i)$:

$$\begin{aligned} v_d(i) &= \sqrt{g\mu/k(i)}; \\ v_r(i) &= \sqrt{(gB)/(2hk(i))}; \\ v_s(i) &= 0,9 \min(v_d(i), v_r(i)), \end{aligned} \quad (9)$$

где g — ускорение свободного падения; μ — коэффициент сцепления с дорогой; B — колея автопоезда; h — высота ЦМ автопоезда.

На втором этапе формируется профиль опорной скорости с учетом дополнительных ограничений. Ограничение скорости может быть обусловлено не только кривизной траектории, но и правилами дорожного движения, а также желаниями водителя, особенностями перевозимого груза. Для учета данных факторов введено ограничение по скорости v_{lim} . Таким образом, в качестве первого приближения опорную скорость можно взять как

$$v^{ref}(i) = \min(v_s(i), v_{lim}). \quad (10)$$

Однако при вычислении опорной скорости необходимо также учитывать ограничения, накладываемые на ускорение, поэтому профиль опорной скорости корректируется, чтобы удовлетворять следующим условиям:

$$a_{\min} \leq [v^{ref}(i) - v^{ref}(i-1)]/T_s \leq a_{\max}, \quad (11)$$

где $a_{\min}$, $a_{\max}$ — минимально и максимально допустимые ускорения, соответственно.

Опорная боковая скорость $v_y^{ref}(i)$ берется равной нулю в каждой точке траектории. Следовательно, опорная продольная скорость равна опорной скорости автопоезда

$$v_x^{ref}(i) = v^{ref}(i). \quad (12)$$

Вычисление вектора опорных управляющих воздействий осуществляется на основе вектора опорных состояний системы. Опорное ускорение $a^{ref}(i)$ вычисляется по формуле

$$a^{ref}(i) = [v_x^{ref}(i+1) - v_x^{ref}(i)]/T_s. \quad (13)$$

Опорный угол поворота управляемых колес $\delta^{ref}(i)$ определяется из кинематических соотношений для автопоезда

$$\delta^{ref}(i) = \arctg(L[\varphi_1^{ref}(i+1) - \varphi_1^{ref}(i)]/S), \quad (14)$$

где L — длина автопоезда. Значения управляющих воздействий в точках с индексами больше H_c принимаются равными нулю.

Как было отмечено ранее, для решения задачи (6) помимо вычисления опорных состояний и управляющих воздействий требуется вычисление матриц нестационарной модели в пространстве состояний $\mathbf{A}_i$ и $\mathbf{B}_i$. Для их получения осуществляется дискретизация модели (1)–(5) с помощью прямого метода Эйлера. Поскольку матрица коэффициентов в левой части выражения (1) является невырожденной [20], система дифференциальных уравнений приводится к явному виду. Затем на ее основе с помощью пакета символьных вычислений Symbolic Math Toolbox среды MATLAB аналитически вычисляется якобиан системы и строится нестационарная линейная модель в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{z}_i, \mathbf{u}_i)}{\partial \mathbf{z}} \right|_{\mathbf{z}_i=\mathbf{z}_i^{ref}, \mathbf{u}_i=\mathbf{u}_i^{ref}}, \\ \mathbf{B}_i &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{z}_i, \mathbf{u}_i)}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{z}_i=\mathbf{z}_i^{ref}, \mathbf{u}_i=\mathbf{u}_i^{ref}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, можно сформулировать следующий пятишаговый алгоритм управления движением автопоезда

Шаг 1. Вычисление опорных состояний $\mathbf{z}_i^{ref}$ по формулам (7)–(12) и управляющих воздействий $\mathbf{u}_i^{ref}$ по формулам (13) и (14).

Шаг 2. Вычисление по формулам (15) матриц $\mathbf{A}_i$ и $\mathbf{B}_i$ нестационарной модели в пространстве состояний, описывающих поведение автопоезда в каждой точке горизонта прогнозирования.

Шаг 3. Вычисление оптимального управления $\mathbf{u}_i^* = [a_i^*, \delta_i^*]^T$ путем решения задачи упреждающего управления (6).

Шаг 4. Вычисление желаемого продольного ускорения $a^* = a_0^*$ и угла поворота управляемых колес $\delta^* = \delta_0^*$.

Шаг 5. Конец алгоритма.

Результаты компьютерного моделирования

Для тестирования предложенного алгоритма управления продольным и боковым движением была разработана компьютерная модель в среде имитационного моделирования Simulink. Для моделирования работы системы планирования пути использовался алгоритм, осуществляющий построение опорной траектории в виде набора клотоид на основе базовых точек маршрута и радиусов скругления в данных точках. Численные значения параметров модели были выбраны приближенными к ха-

рактеристикам реального автопоезда, состоящего из автомобиля-тягача КАМАЗ и полуприцепа НЕФАЗ: $m_1 = 7000$ кг; $m_2 = 15\,000$ кг; $J_1 = 15\,000$ кг·м²; $J_2 = 20\,000$ кг·м²; $l_1 = 1,2$ м; $l_2 = 2,38$ м; $l_3 = 4,34$ м; $d_1 = 1,815$ м; $d_2 = 4,34$ м; $k_{\alpha 1} = 50\,000$ Н/рад; $k_{\alpha 2} = k_{\alpha 3} = 150\,000$ Н/рад.

Большую роль при разработке алгоритма упреждающего управления играет выбор матриц весовых коэффициентов $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$. В данной работе они выбирались исходя из следующих соображений. При прохождении криволинейных участков, как правило, приоритет имеет удержание ТС на опорной траектории, даже если для этого приходится снижать скорость. Исходя из этого наибольший вес присвоен элементам матрицы $\mathbf{Q}$, которые соответствуют координатам автопоезда, а второй по величине — продольной скорости автопоезда. Весовые коэффициенты остальных переменных состояния (прочие элементы матрицы $\mathbf{Q}$) и управляющих воздействий (матрица $\mathbf{R}$) взяты равными между собой и имеющими меньший вес. Для снижения влияния размерностей курсовых углов автомобиля-тягача и полуприцепа, а также угла поворота управляемых колес на целевую функцию использовались масштабирующие коэффициенты.

Для решения задачи оптимизации (6) используется MPC-решатель пакета Model Predictive Control Toolbox среды MATLAB. Параметры MPC-решателя:

$$\begin{aligned} T_s &= 0,01 \text{ с}; H_p = 26; H_c = 5; \\ \mathbf{Q} &= \text{diag}\{0,15, 0,1, 0,1, 0,1, 1, 1, 0,1, 0,1\}; \\ \mathbf{R} &= \text{diag}\{0,1, 0,1\}. \end{aligned}$$

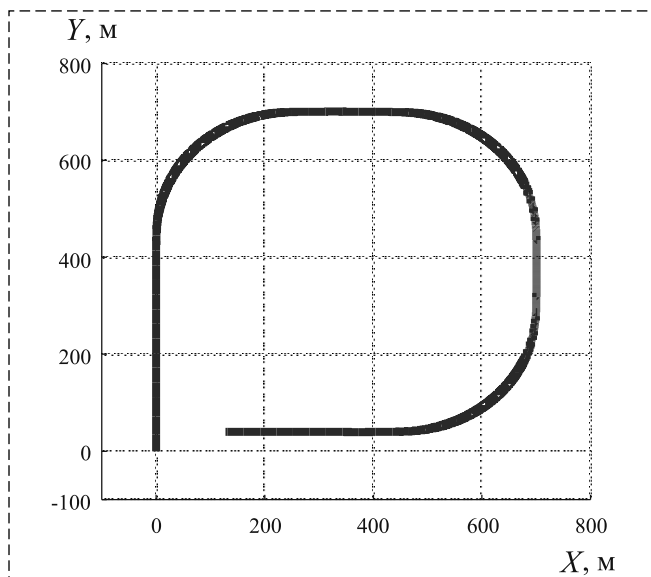


Рис. 1. Опорная траектория
Fig. 1. Reference path

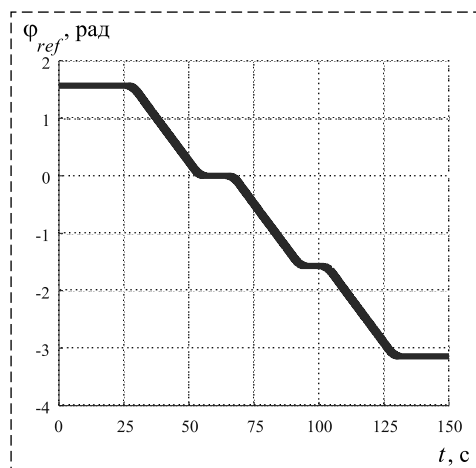


Рис. 2. Опорный курсовой угол
Fig. 2. Reference yaw angle

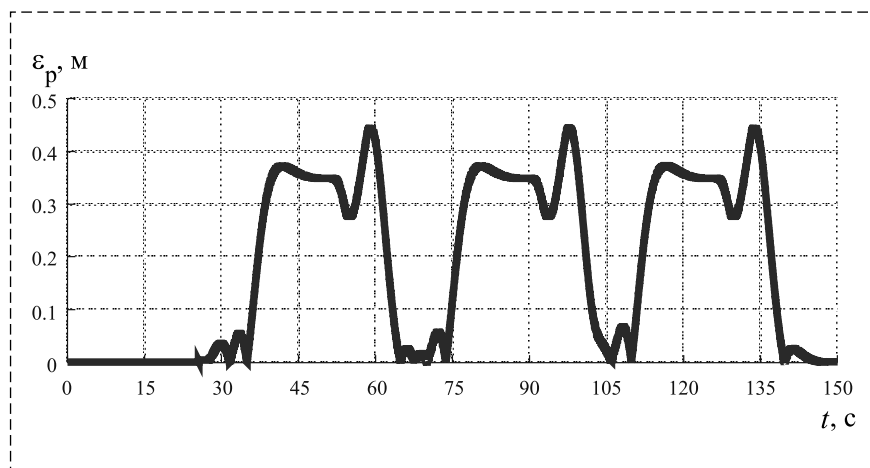


Рис. 3. Отклонение автопоезда от опорной траектории
Fig. 3. Deviation of the road train from the reference path

Была проведена серия компьютерных экспериментов для оценки работоспособности представленного алгоритма. Тестирование проводили при желаемых скоростях от 10 до 24 м/с на траектории с радиусом кривизны порядка 250 м (рис. 1), что сопоставимо с рекомендуемым для автомагистралей значением [23]. Результаты моделирования движения автопоезда с желаемой скоростью 16 м/с приведены на рис. 2, 3 и рис. 4–8 (см. вторую сторону обложки). Кроме того, проводили тестирование на траекториях с радиусами кривизны от 150 до 300 м при желаемой скорости 16 м/с.

Обсуждение

Графики на рис. 2–8 показывают, что алгоритм обеспечивает достаточно высокую точность следования опорной траектории и поддержание скорости, близкой к ее опорному значению. Наибольшие отклонения от опорной продольной скорости (рис. 5, см. вторую сторону обложки) наблюдаются на начальном этапе моделирования. Они вызваны высоким значением продольного ускорения (рис. 7, см. вторую сторону обложки) (на уровне насыщения), однако, так как начальное состояние автопоезда задается равным опорному, причины возникновения этого явления требуют дальнейшего изучения.

Кроме того, следует отметить, что вычисленный упреждающим алгоритмом для прохождения по опорной траектории угол поворота управляемых колес автопоезда значительно отличается от опорного значения (рис. 8, см. вторую сторону обложки). По-видимому, это связано с тем, что для его вычисления исполь-

зовалась простая формула (14), учитывающая только кинематические соотношения и, строго говоря, справедливая лишь для случая, когда угол складывания автопоезда равен нулю.

В целом, результаты компьютерных испытаний показывают, что с увеличением скорости или уменьшением радиуса кривизны траектории возрастает и ошибка между опорными и фактическими значениями состояний и управляющих воздействий. По-видимому, это связано с увеличением влияния нелинейных составляющих движения автопоезда. В целом разработанный алгоритм демонстрирует высокую точность следования траектории при желаемых скоростях до 18 м/с на траекториях с радиусом кривизны не менее 250 м. Таким образом, использование даже простых формул для расчета опорных курсовых углов полуприцепа и углов поворота управляемых колес позволяет добиться хороших результатов на траекториях с радиусами кривизны поворотов, сопоставимыми с рекомендуемыми для автомагистралей значениями.

Заключение

В представленной работе предложен упреждающий алгоритм управления продольным и боковым движением автопоезда, обеспечивающий движение по траектории, сгенерированной системой планирования пути, с оптимальной скоростью. Построена дискретная линейная нестационарная модель для прогнозирования отклонений автопоезда от опорного состояния. Представлены формулы для вычисления векторов опорных состояний и управляющих воздействий. Результаты компьютерного моделиро-

вания показывают работоспособность предложенного алгоритма. В дальнейшем предлагается рассмотреть возможность вычисления опорного курсового угла полуприцепа и опорного угла поворота управляемых колес с учетом угла складывания автопоезда. Разработанный алгоритм может быть использован на практике в качестве основы при разработке систем активной помощи водителю и автономных автопоездов.

Список литературы

1. **Автомобильный справочник BOSCH/Пер. с англ. М.: За рулем. 2004. 992 с.**
2. **Cheng H.** Autonomous Intelligent Vehicles Theory Algorithms and Implementation. London: Springer Science & Business Media, 2011.
3. **Ziegler J. et al.** Making Bertha drive — An autonomous journey on a historic route // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. 2014. Т. 6, № 2. С. 8—20. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.640.1737&rep=rep1&type=pdf>.
4. **Xiao L., Gao F.** A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems // Vehicle System Dynamics. 2010. Т. 48, № 10. С. 1167—1192. URL: https://www.researchgate.net/profile/Lingyun_Xiao/publication/2453096.
5. **Nouveliere L., Mammar S.** Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding mode technique // Control Engineering Practice. 2007. Т. 15, № 8. С. 943—954. URL: <http://aramis.iup.univ-evry.fr:8080/~smam/publications/publis2003/ACC2003-1.pdf>.
6. **El Majdoub K., Giri F., Ouadi H., Dugard L., Zara F.** Vehicle longitudinal motion modeling for nonlinear control // Control Engineering Practice. 2012. Т. 20, № 1. С. 69—81. URL: <http://www.edream.ma:8080/jspui/bitstream/123456789/1666/1/Vehicle%20longitudinal%20motion%20modeling%20for%20nonlinear%20control.pdf>.
7. **Волков В. Г., Демьянов Д. Н.** Синтез и нейросетевая реализация ПИ регулятора адаптивного круиз-контроля грузового автомобиля // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 11. С. 707—713.
8. **Snider J. M. et al.** Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking // Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08. 2009. URL: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/2/Automatic_Steering_Methods_for_Autonomous_Automobile_Path_Tracking.pdf.
9. **Thrun S. et al.** Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge // Journal of field Robotics. 2006. Т. 23, № 9. С. 661—692. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.20147>.
10. **Onieva E. et al.** Automatic lateral control for unmanned vehicles via genetic algorithms // Applied Soft Computing. 2011. Т. 11, № 1. С. 1303—1309. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.710.4608&rep=rep1&type=pdf>.
11. **Алексеев К. Б., Малявин А. А., Палагута К. А.** Сравнительный анализ предикторного и нечеткого управления движением автомобиля // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 5. С. 36—45.
12. **Nehaoua L., Nouvelière L.** Backstepping based approach for the combined longitudinal-lateral vehicle control // Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE. IEEE, 2012. С. 395—400. URL: <http://nehsetl.free.fr/nehhaoua2012.pdf>.
13. **Menhour L. et al.** Algebraic nonlinear estimation and flatness-based lateral/longitudinal control for automotive vehicles // Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on. IEEE, 2011. С. 463—468. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.940.6891&rep=rep1&type=pdf>.
14. **Attia R., Orjuela R., Basset M.** Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance // Vehicle System Dynamics. 2014. Т. 52, № 2. С. 261—279. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01027591/document>.
15. **Falcone P. et al.** A hierarchical model predictive control framework for autonomous ground vehicles // American Control Conference, 2008. IEEE, 2008. С. 3719—3724. URL: <https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/acc08/data/papers/1111.pdf>.
16. **Kevin T. et al.** Predictive control approach to autonomous vehicle steering // American Control Conference, 2006. IEEE, 2006. С. 6. URL: <https://borrelli.me.berkeley.edu/pdf/pub/pub-27.pdf>.
17. **Kühne F., Lages W. F., Silva J. M. G.** Mobile robot trajectory tracking using model predictive control // II IEEE latin-american robotics symposium. 2005. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/390f/82152011352de1d74185b3581167a30909f8.pdf>.
18. **Zeilinger M.** Real-time model predictive control: Ph.D. Thesis. ETH Zurich, 2011. 177 p.
19. **Афанасьев Л. Л., Дьяков А. Б., Иларионов В. А.** Конструктивная безопасность автомобилей. М., 2013. 212 с.
20. **Волков В. Г., Демьянов Д. Н., Карабцев В. С.** Разработка и исследование математической модели плоского движения автомобиля с полуприцепом // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 7. С. 29—43.
21. **Rajamani R.** Vehicle dynamics and control. Springer Science & Business Media. 2012. 496 p.
22. **Olsson C.** Model complexity and coupling of longitudinal and lateral control in autonomous vehicles using model predictive control. 2015.
23. **СП 42.13330.2011** Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (с Поправкой и Изменением N 1).

Predictive Coupled Control of the Road Train Longitudinal and Lateral Motion on a Curved Path

G. R. Galimova, gulshat.galimova.1995@mail.ru, **V. G. Volkov**, vgvolkov93@mail.ru,

I. Z. Akhmetzyanov, Akhmetzyanov.IZ@kamaz.ru

Kazan Federal University, Kazan, 420008, Naberezhnye Chelny Institute, Russian Federation, KAMAZ PTC, Naberezhnye Chelny, 423800, Scientific and Technical Center, Russian Federation

Corresponding author: **Galimova G. R.**, Postgraduate Student, Kazan Federal University, Kazan, 420008, Naberezhnye Chelny Institute, Russian Federation, e-mail: gulshat.galimova.1995@mail.ru

Accepted on August 10, 2020

Abstract

In this paper, we consider the problem of a road train path-following on a curved path with an optimal velocity. To solve the problem, we propose a control algorithm based on the coupled model predictive control strategy. Model predictive control assumes the computation of a control sequence by solving an optimal control problem on a finite horizon for a current state of a nonlinear

time-varying system. We use the truck steering angle and road train acceleration as control inputs. We describe the road train longitudinal and lateral dynamics using an implicit nonlinear model in continuous time. To derive a discrete linear time-varying state-space prediction model describing the deviations of system dynamics from a reference path we use the Euler method to discretize the original system and compute analytical formulae for its Jacobian by MATLAB Symbolic Math Toolbox. We calculate the reference path and corresponding reference values of the state vector applying the well-known geometric techniques, which utilize the path coordinates and its curvature information. We take the reference values of a truck and a semitrailer yaw angles to be equal. Thus, the reference value of the jackknifing angle is zero. The calculations of reference velocity take into account its skid and rollover limits. To validate the proposed path-following algorithm on the road train we design a simulation model in Simulink. The paper presents the simulation results of testing the movement of a road train along a given path for various values of the reference speed. We show that the algorithm provides high enough reference path-following accuracy, vehicle reference speed tracking, and low values of the jackknifing angle on the speed values up to 18 m/s and curvature radii down to 250 m. The proposed algorithm can be used in ADAS-systems and autonomous vehicles development.

Keywords: model predictive control, coupled control, vehicle longitudinal dynamics, vehicle lateral dynamics, path following, road train

For citation:

Galimova G. R., Volkov V. G., Akhmetzyanov I. Z. Predictive Coupled Control of the Road Train Longitudinal and Lateral Motion on a Curved Path, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 630—638.

DOI: 10.17587/mau.21.630-638

References

1. Bosch Automotive Handbook. 5th Edition. Stuttgart. Robert Bosch GmbH. 2000. 960 p.
2. Cheng, H. Autonomous Intelligent Vehicles Theory Algorithms and Implementation, London, Springer Science & Business Media, 2011.
3. Ziegler J., Dang T., Franke U., Lategahn H., Bender P., Schreiber M., Strauss T., Appenrodt N., Keller C., Kaus E., Stiller C., Herrtwich R., Rabe C., Pfeiffer D., Lindner F., Stein F., Erbs F., Enzweiler M., Knoppel C., Hipp J., Hauers M., Trepte M., Brenk C., Tamke A., Ghanaat M., Braun M., Joos A., Fritz H., Mock H., Hein M., Zeeb E. Making Bertha drive — An autonomous journey on a historic route, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 8—20, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.640.1737&rep=rep1&type=pdf>.
4. Xiao L., Gao F. A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems, *Vehicle System Dynamics*, 2010, vol. 48, no. 10, pp. 1167—1192. URL: https://www.researchgate.net/profile/Lingyun_Xiao/publication/2453096.
5. Nouveliere L., Mammar S. Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding mode technique, *Control Engineering Practice*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 943—954, available at: <http://aramis.iup.univ-evry.fr:8080/~smam/publications/public2003/ACC2003-1.pdf>.
6. El Majdoub K., Giri F., Ouadi H., Dugard L., Zara F. Vehicle longitudinal motion modeling for nonlinear control, *Control Engineering Practice*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 69—81, available at: <http://www.edream.ma:8080/jspui/bitstream/123456789/1666/1/Vehicle%20longitudinal%20motion%20modeling%20for%20nonlinear%20control.pdf>.
7. Volkov V. G., Demyanov D. N. Synthesis and Approximation of Control in Adaptive Cruise Control Systems of Commercial Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, 19(11), 707—713 (in Russian).
8. Snider, J. M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking, Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08. 2009, available at: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/2/Automatic_Steering_Methods_for_Autonomous_Automobile_Path_Tracking.pdf.
9. Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J. Halpenny M., Hoffmann G., Lau K., Oakley C., Palatucci M., Pratt V., Stang P., Strohband S., Dupont C., Jendrossek L., Koelen C., Markey C., Rummel C., Niekirk J., Jensen E., Alessandrini P., Bradski G., Davies B., Ettinger S., Kachler A., Nefian A., Mahoney P. Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge, *Journal of field Robotics*, 2006, vol. 23, no. 9, pp. 661—692, available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.20147>.
10. Onieva E., Naranjo J. E., Milanés V., Alonso J., García R., Pérez J. Automatic lateral control for unmanned vehicles via genetic algorithms, *Applied Soft Computing*, 2011, vol. 11, no. 1, pp. 1303—1309, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.710.4608&rep=rep1&type=pdf>.
11. Alekseev K. B., Malyavin A. A., Palaguta K. A. Comparative analysis of model predictive and fuzzy control of vehicle motion, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, no. 5, pp. 36—45 (in Russian).
12. Nehaoua L., Nouvelière L. Backstepping based approach for the combined longitudinal-lateral vehicle control, *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2012 IEEE, 2012, pp. 395—400, available at: <http://nehsetl.free.fr/nehhoua2012.pdf>.
13. Menhour L., d'Andréa-Novet B., Boussard C., Fliess M., Mounier H. Algebraic nonlinear estimation and flatness-based lateral/longitudinal control for automotive vehicles, *Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2011 14th International IEEE Conference on. IEEE, 2011, pp. 463—468, available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.940.6891&rep=rep1&type=pdf>.
14. Attia R., Orjuela R., Basset M. Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance, *Vehicle System Dynamics*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 261—279, available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01027591/document>.
15. Falcone P., Borrelli F., Tseng H. E., Asgari J., Hrovat D. A hierarchical model predictive control framework for autonomous ground vehicles, *American Control Conference, 2008. IEEE*, 2008, pp. 3719—3724, available at: <https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/acc08/data/papers/1111.pdf>.
16. Keviczky T., Falcone P., Borrelli F., Asgari J., Hrovat D. Predictive control approach to autonomous vehicle steering, *American Control Conference*, 2006. IEEE, 2006, pp. 6, available at: <https://borrelli.me.berkeley.edu/pdfpub/pub-27.pdf>.
17. Kühne F., Lages W. F., Silva J. M. G. Mobile robot trajectory tracking using model predictive control, *II IEEE latin-american robotics symposium*, 2005, available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/390f/82152011352de1d74185b3581167a30909f8.pdf>.
18. Zeilinger M. Real-time model predictive control: Ph.D. Thesis, ETH Zurich, 2011, 177 p.
19. Afanasiev L. L., Dyakov A. B., Ilarionov V. A. Vehicle Design Safety, Moscow, 2013, 212 p.
20. Volkov V. G., Demyanov D. N., Karabtsev V. S. Development and Research of the Mathematical Model of Planar Motion of a Vehicle with a Semitrailer, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 99—110 (in Russian).
21. Rajamani R. Vehicle dynamics and control, Springer Science & Business Media, 2012, 496 p.
22. Olsson C. Model complexity and coupling of longitudinal and lateral control in autonomous vehicles using model predictive control, 2015.
23. SP 42.13330.2011 Urban planning. Planning and development of cities and settlements. Updated version of SNiP 2.07.01-89 * (as Amended and Amended N 1) (in Russian).

В. А. Галузин¹, аспирант, vladimir.galuzin@gmail.com,

А. Ю. Кутоманов², канд. техн. наук, заместитель начальника ЦУП, kutomanov@mcc.rsa.ru,

М. М. Матюшин², д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора, MatyushinMM@tsniimash.ru,

П. О. Скобелев^{3,4}, д-р техн. наук, зав. лабораторией "Мультиагентные системы", petr.skobelev@gmail.com,

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара,

² АО "ЦНИИмаш", г. Королев, Московская обл.,

³ Самарский федеральный исследовательский центр РАН,

⁴ Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

Обзор современных методов планирования работы перспективных космических систем*

Выполнен обзор работ по актуальной в настоящее время проблеме планирования работы космических систем наблюдения, позволяющий дать оценку текущего состояния исследований по данной тематике, возможности их практического применения полученных результатов и перспектив развития. Приводится перечень требований, которым должны удовлетворять методы и средства планирования для обеспечения возможности применения их на практике. Описывается общая постановка задачи планирования работы космических систем наблюдения, позволяющая дать оценку ее сложности и многокритериальности. Анализируются работы, посвященные как разработке методик решения описанной задачи в общем виде, так и исследованиям, направленным на решение частных проблем, таких как: планирование работы целевой аппаратуры космического аппарата с учетом максимально возможного отклонения линии визирования от вертикали, планирование съемки с учетом быстроменяющихся метеоусловий, оптимизация выполнения сеансов связи между спутником и наземными станциями, оптимизация наблюдения площадного района и т.д. По результатам проведенного анализа делаются выводы, что имеющиеся в настоящее время методики планирования в основном имеют централизованный характер и опираются на различного рода эвристики для сокращения перебора, реализуемые как модификации под конкретную задачу. Кроме того, ни одно из решений, предложенных в рассмотренных статьях, не соответствует требованиям по масштабируемости, адаптивности, учету индивидуальных особенностей заявок и ресурсов и гибкости решения. Для преодоления приведенных недостатков предлагается расширенное применение мультиагентных технологий. Однако это требует значительной работы для их развития с учетом специфики данной задачи. Развитие предлагаемых подходов в перспективе позволит создавать автономные интеллектуальные системы управления спутниковыми группировками по типу "самоорганизующихся роев", со встроенными способностями к прямому взаимодействию и принятию решений в каждом спутнике, канале и узле связи, что предполагает реализацию полного цикла распределенного многокритериального ситуационного управления ресурсами в реальном времени.

Ключевые слова: космические системы, спутники, наземные станции, объекты наблюдения, методы планирования, мультиагентные технологии

Введение

Актуальность проблемы планирования работы космических систем наблюдения (КСН) обусловлена в первую очередь ростом числа

потребителей космических услуг в сфере дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и, как следствие, многократным увеличением числа заявок на съемку объектов наблюдения (ОН), повышением требований к оперативности получения данных и их информационной эффективности. Полученная в ходе проведения анализа результатов ДЗЗ информация находит применение в самых различных областях: сельском хозяйстве, геологических и гидрологических исследованиях, военной сфере, при ликвидации последствий стихийных бедствий, при создании планов территорий и во многих других сферах деятельности [1].

* Работа подготовлена на основе материалов научных исследований в рамках Госбюджетной темы Самарского федерального исследовательского центра РАН, Института проблем управления сложными системами РАН № АААА-А19-119030190053-2 "Разработка и исследование методов и средств аналитического конструирования, компьютерного представления знаний, вычислительных алгоритмов и мультиагентных технологий в задачах оптимизации процессов управления сложными системами".

Для удовлетворения сложившихся потребностей в космической отрасли развивается процесс, направленный на создание, развертывание и эксплуатацию КСН, включающих разнородную группировку низкоорбитальных космических аппаратов (КА), состоящую как из традиционных КА большой массы, так и из малых космических аппаратов, массой до 500 кг, и распределенную сеть наземных станций приема информации (НСПИ). Примерами таких систем являются проект компании *Planet Labs*, спутниковая группировка которого насчитывает более 200 действующих спутников *Dove (Flock)* и 13 спутников субметрового разрешения *SkySat* [2], и проект компании *BlackSky Global*, предусматривающий формирование к 2020 г. орбитальной группировки из 60 спутников ДЗЗ и 17 станций приема и управления [3]. Применение подобных КСН приводит к резкому увеличению числа просмотров поверхности (группировка проекта *BlackSky Global* должна обеспечить максимальную частоту просмотра до 40...70 пролетов в сутки для районов с широтами между $\pm 55^\circ$ [3]) и размера исследуемых территорий (группировка компании *Planet Labs* позволяет ежедневно получать изображение всей поверхности Земли с разрешением не хуже 5 м [2]).

Существенное повышение разрешения снимков, получаемых с КА, с одновременным увеличением оперативности обработки заявок на съемку ОН и выдачи информации конечному потребителю приводит к необходимости значительного увеличения орбитальной группировки разнородных КА, что, в свою очередь, ведет к многократному росту числа потенциально возможных вариантов съемки ОН и передачи полученных данных на Землю. Применение традиционных методов управления КА, основанных только на использовании наземного контура управления и существующих методов планирования, применительно к многоспутниковым (более 100 КА) орбитальным группировкам приведет к возникновению конфликтных ситуаций, когда одновременно несколько КА претендуют на съемку одного и того же ОН, либо на передачу данных на одну и ту же НСПИ. Все это обуславливает сложность задачи формирования таких планов работы КСН, реализация которых обеспечивает максимальную ценность собранных данных в условиях имеющихся ограничений.

Кроме того, повышение требований к оперативности обслуживания заявок на съемку ОН обуславливает необходимость в динамической

адаптивной корректировке расписания работы КСН по мере поступления в систему новых заявок на съемку в реальном времени или в случае возникновения непрогнозируемых событий, связанных с отказом оборудования или с быстроменяющейся метеорологической обстановкой. Помимо этого большую роль в вопросах повышения оперативности обслуживания заявок играет показатель доступности бортовой аппаратуры КА, зависящий от числа витков КА, проходящих в зоне радиовидимости НСПИ, а также от оптимизации баллистического построения орбитальной группировки.

Исходя из вышесказанного можно выделить следующие требования, которым должны удовлетворять методы и средства планирования для обеспечения возможности практического применения для создания плана работы современной КСН:

- масштабируемость: возможность планирования выполнения большого числа заявок на съемку ОН на длительный интервал времени крупномасштабной разнородной орбитальной группировкой с учетом эволюции баллистического построения орбитальной группировки;
- адаптивность: изменение планов работ доступных ресурсов в соответствии с событиями в режиме реального времени или близком к нему, без останова и полного пересчета расписания работы группировки КА;
- учет индивидуальных особенностей заявок и ресурсов для построения наиболее оптимального решения при многокритериальной оптимизации;
- гибкость: необходимо предоставлять возможность легкой интерактивной настройки процесса планирования, а также доработки его результатов;
- оперативность: минимальное время от появления заявки до получения информации об ОН;
- производительность: высокая скорость обработки, квазилинейная с ростом числа заявок и ресурсов КА и НСПИ;
- надежность и живучесть: возможность выполнения задачи даже в случае выхода из строя любого из ресурсов.

Указанные требования на практике существенно затрудняют использование традиционных методов и средств комбинаторного перебора и математического программирования и вынуждают разрабатывать и применять различные эвристики.

В настоящей работе делается попытка провести обзор существующих подходов в целях выбора наиболее перспективных для дальнейшей разработки.

Постановка задачи

Общую постановку задачи планирования работы КСН можно представить следующим образом. Пусть имеется модель КСН, описываемая входящими в ее состав множеством КА, в котором каждый КА характеризуется набором элементов орбиты, полной математической моделью возмущающих воздействий (в зависимости от параметров орбиты функционирования), параметрами установленного на него бортового оборудования, и множеством НСПИ, в котором каждая станция характеризуется географическим местоположением и параметрами установленной антенны. Для НСПИ могут быть также указаны графики работы, интервалы недоступности, а также среднее время подготовки станции к приему информации.

Пусть также задано множество ОН, которые необходимо снять. ОН могут быть как точечные, так и площадные. Точечный объект имеет небольшие размеры, и его снимок может быть получен за один пролет. Для съемки площадного объекта наблюдения необходимо несколько пролетов КА. Для ОН может быть указан его приоритет, периодичность съемки и множество ограничений, таких как момент времени, до которого необходимо получить снимки, условия съемки, требования к характеристикам применяемой съемочной аппаратуры и пространственному разрешению.

В модели работы КА рассматриваются две операции: съемка ОН и проведение сеанса связи КА с НСПИ для передачи полученных данных на Землю, а в модели работы НСПИ — операция получения данных с КА.

Требуется составить план работы КСН по съемке заданных ОН. Результатом планирования является расписание выполнения соответствующих операций КА и НСПИ, составленное в соответствии с критерием минимизации времени доставки снимков потребителям, а также максимизации их качества. При этом должны выполняться следующие условия:

- наличие наблюдаемости ОН при съемке с КА;
- наличие видимости между КА и НСПИ при проведении сеанса связи;
- наличие свободного места в бортовом запоминающем устройстве КА;

- достаточный уровень заряда батареи КА для проведения операций;
- работа по съемке не должна нарушать ограничения доступности и график работы ресурсов, участвующих в ней;
- согласованность порядка проведения операций элементами КСН;
- КА и НСПИ могут одновременно выполнять не более одной операции.

Кроме того, должны быть удовлетворены описанные ранее требования для методов и средства планирования работы современной КСН, такие как масштабируемость, адаптивность, производительность и т.д.

Обзор работ

Актуальность поставленной задачи приводит к стремительному росту числа работ по данной тематике. Так, число работ в базе данных *Scopus*, посвященных описанию методик решения как проблемы планирования работы КСН в целом, так и отдельных ее задач, увеличилось за последнее десятилетие в 2,5 раза.

В связи с этим представляет особый интерес анализ основных направлений развития моделей, методов и средств планирования как одиночных КА, так и многоспутниковых группировок.

Далее представлен обзор наиболее интересных работ, посвященных постановкам задач планирования и применяемым на практике методам.

1. Планирование спутниковых сеансов связи на основе методов имитации отжига и поиска опций с запретами

В статье [4] рассматривается проблема планирования сеансов связи между канадским радиолокационным спутником ДЗЗ *RADARSAT-2* и наземными станциями, вызванная высокой нагрузкой на нисходящие линии связи из-за большого объема целевой информации, получаемой в ходе проведения ДЗЗ.

В данной спутниковой миссии планирование проведения съемки ОН осуществляется непосредственно клиентами и управляется их приоритетами. Таким образом, предполагается, что расписание съемок известно заранее и не изменяется в процессе планирования. Запросы клиентов подразделяются на срочный и регулярные. Выполнение срочного запроса должно происходить как можно ближе к моменту их появления в системе. Размещение регулярных запросов является более гибким

и определяется в первую очередь приоритетом данных запросов.

Для решения поставленной задачи планирования авторы статьи предлагают применение алгоритма имитации отжига и алгоритма поиска с запретами (табу). Вместо учета срочности запросов отдельно в целевой функции процесс планирования разделяется на две стадии: на первой стадии проводится планирование всех срочных запросов, на второй стадии на оставшихся ресурсах размещаются все регулярные запросы. Таким образом, данный подход учитывает специфику приоритезации срочных запросов над обычными.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый подход позволяет получить более близкое к оптимальному расписание сеансов связи, чем часто применяемые на практике жадные алгоритмы оптимизации.

В качестве ограничения данной методики можно выделить жесткую привязку вводимых моделей и эвристик к конкретному типу и модели КА.

2. Эвристическое планирование спутниковой съемки с разбиением площадного объекта на полосы

В статье [5] рассматривается проблема планирования съемки районов наблюдения одиночным разворачиваемым КА ДЗЗ. Благодаря своей маневренности КА данного типа позволяют провести съемку большей площади поверхности Земли. Однако при этом увеличивается сложность задачи за счет появления множества альтернативных вариантов съемки.

В работе делается предположение о том, что поворачиваемые КА находятся на периодических солнечно-синхронных орбитах, что позволяет снизить накладные расходы при расчете моментов прохождения КА над районом наблюдения.

Алгоритм, предлагаемый авторами статьи, выполняет оптимизацию расписания по критериям оперативности проведения съемки и качества получаемых данных и может быть применен для планирования работы КА с различными техническими характеристиками. Данный алгоритм состоит из двух этапов, тесно связанных между собой. На первом этапе выполняется геометрический анализ путем проведения геометрической классификации ОН на точечные, протяженные и площадные и последующее их разделение на отдельные полосы в соответствии с направлением локсодро-

мических линий, вдоль направления которых должна проводится съемка. В конце геометрического анализа выполняется расчет временных окон возможных съемок полученных полос. На втором этапе планирование съемки ведется с учетом различных функций расчета расстояния для идеальной орбиты.

Проведенные исследования работы разработанного алгоритма показали его эффективность в оптимизации плана съемки ОН по критериям оперативности проведения съемки и качества получаемых данных.

В качестве недостатков предлагаемой методики можно выделить тот факт, что при планировании не учитываются ограничения, вызванные потреблением спутником памяти и энергии в процессе функционирования.

3. Применение муравьиного алгоритма для планирования использования ресурсов для управления спутниками

Авторами статьи [6] предлагается решение задачи планирования работы ресурсов управления низкоорбитальными спутниками с помощью простого муравьиного алгоритма.

Целью оптимизации в данной задаче является оптимизация загрузки ресурсов. В качестве ключевой особенности задачи выделяется разреженное пространство решений, затрудняющее ее решение с помощью традиционных алгоритмов оптимизации.

В роли модели для последующей оптимизации загрузки ресурсов управления вводится так называемый граф конфликтов, в котором выделяют два типа конфликтов: в первом случае конфликт возникает, потому что один спутник виден одновременно нескольким наземным станциям, во втором случае конфликт возникает из-за нахождения в зоне радиовидимости одной и той же наземной станции более одного спутника в одно время. Для соответствия требованиям сети управления и возможности практического применения полученного решения параметры алгоритма, определяющие пределы, обновление и инициализацию феромона, задаются как константы.

Результаты экспериментального исследования сравнения описанной методики планирования с другим новым вариантом реализации муравьиного алгоритма демонстрируют превосходство представленного решения. Однако в случае задач большой размерности производительность метода деградирует, т.е. начинает быстро расти время вычислений.

4. Планирование работы КА с помощью метода локального поиска в расширяемой окрестности

В статье [7] рассматривается проблема планирования съемки районов наблюдения однократным поворачиваемым КА *AS-01*. В качестве ее отличительной особенности выделяется необходимость учета ограничения на требуемое время перехода КА от одного момента съемки к другому.

Для решения данной задачи авторы статьи предлагают применять адаптивный алгоритм поиска в расширяемой окрестности (англ. *Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)*). *ALNS* представляет собой структуру локального поиска, в которой ряд простых операторов конкурируют за изменение текущего решения. В описанной реализации *ALNS* задается шесть операторов удаления и три оператора вставки. Для возможности гибкой адаптации расписания для каждой запланированной задачи на съемку рассчитываются как предыдущие, так и последующие возможные варианты съемки. После этого на каждой итерации на основе анализа информации о требуемом времени перехода от съемки одного объекта к съемке другого выбирается пара операторов для уничтожения текущего решения и создания нового с большим набором измененных переменных.

Для анализа эффективности представленной методики было разработано множество сценариев, которые показали, что построенное расписание съемки объектов наблюдения позволяет практически в полной мере использовать доступные ресурсы спутника независимо от того, как распределены задачи.

В качестве ограничения предлагаемой методики можно выделить ее низкую универсальность ввиду привязки к конкретной модели спутника.

5. Применение генетического алгоритма для планирования съемки площадных объектов в спутниковой группировке ДЗЗ

Авторы статьи [8] предлагают решение проблемы планирования съемки спутниковой группировкой ДЗЗ площадных ОН путем применения многокритериального генетического алгоритма.

Сложность задачи заключается в необходимости планирования нескольких операций съемки ОН для полного его покрытия. Кроме того, многоспутниковое планирование съемки площадных ОН является многокритериальной задачей оптимизации, при этом одновремен-

ная оптимизация сразу по всем критериям невозможна, поскольку они могут противоречить друг другу. Так, например, невозможно одновременно получить снимок с высоким линейным разрешением и обширной зоной покрытия в самый короткий срок.

Представленную в статье методику планирования кратко можно описать следующим образом. Вначале осуществляется поиск соответствия (матчинг) между задачами на съемку районов наблюдения и КА ДЗЗ для определения соответствия характеристик съемочной аппаратуры КА требованиям, предъявляемым к результатам съемки. Затем выполняется декомпозиция площадного ОН на множество полос съемки. Далее задача планирования съемки полученных полос представляется в виде многокритериальной модели целочисленного программирования. После этого применяется многокритериальный генетический алгоритм *NSGA-II* для получения оптимального расписания съемки.

Сравнение разработанного алгоритма с генетическим и жадным алгоритмом оптимизации показало, что описанный алгоритм в случае многокритериальной оптимизации дает более близкое к оптимальному решение.

В качестве ограничений разработанной методики авторы статьи выделяют тот факт, что для выполнения съемки районов наблюдения предполагается привлечение спутниковых группировок сразу из нескольких космических агентств, что повышает оперативность и полноту охвата.

Однако на практике сбор спутниковых снимков, полученных несколькими агентствами, может быть весьма затруднен. В качестве еще одного недостатка предлагаемой модели авторы статьи выделяют отсутствие учета влияния на съемку облачного покрова и других факторов.

6. Метод планирования сеансов связи КА с наземными станциями с разбором конфликтов

В статье [9] описывается высокопроизводительная методика планирования сеансов связи между КА и НС. Ее авторы анализируют конфликты между различными сеансами связи и представляют метод их разрешения.

В предлагаемом методе первоначально с помощью стратегии предварительного планирования строится начальное допустимое расписание, а затем полученное расписание улучшается в соответствии со стратегией перепланирования в подпространстве возможных решений. Идея стратегии предварительного размещения заключается в отдаче приоритета при размещении

менее гибким запросам с более высокой прибылью, которые оказывают минимальное влияние на незапланированные запросы. Идея стратегии перепланирования заключается в разрешении конфликтов между незапланированными запросами и запланированными запросами в соответствии с правилами вставки и запрета и механизмом самоадаптации. В данной стратегии основная сложность состоит в том, как выявлять непримиримые конфликты и как находить оптимальные интервалы вставки для операций обмена. Новая идея предложенного метода заключается в необходимости различать совместимые и непримиримые конфликты, а также в запрете неэффективных обменов между незапланированными и запланированными запросами.

Анализ результатов разработанного алгоритма показал его значительное превосходство над классическими алгоритмами оптимизации.

7. Метод линейного целочисленного программирования для планирования съемки объектов наблюдения спутниковой группировкой с учетом возможной облачности

В статье [10] рассматривается проблема планирования съемки ОН группировкой КА ДЗЗ с учетом возможной облачности. Авторы моделируют условия облачности при съемке как стохастические события и расширяют определение назначения для модели программирования в случайных ограничениях.

Для решения поставленной проблемы предлагается метод выборочной аппроксимации, который преобразует модель программирования в случайных ограничениях в модель линейного целочисленного программирования. Полученная модель решается с помощью разработанного алгоритма ветвления и разреза, основанного на генерации "ленивых" вычислений.

Множественные имитационные эксперименты показывают эффективность и достоверность предлагаемой методики.

Однако в качестве ограничения предлагаемого подхода можно выделить отсутствие в описанной модели случая разворачиваемых спутников, часто используемых на практике.

8. Усовершенствованный метод поиска в расширяющейся окрестности для планирования работы нескольких спутников

Авторы статьи [11] расширяют методику планирования съемки районов наблюдения одиночным поворачиваемым спутником ДЗЗ с помо-

щью ALNS, описанную в работе [7], для случая с несколькими спутниками. Подчеркивается, что данная задача является значительно более сложной, чем в первом случае вследствие гораздо большего пространства возможных решений.

В структуру алгоритма *ALNS* вводится адаптивный механизм распределения задач путем определения пяти операторов назначения. На каждом шаге итерации эти операторы выбираются адаптивно, чтобы направлять алгоритм для эффективного поиска в пространстве решений расширяющейся окрестности.

Анализ результатов множества экспериментов показывает большую эффективность предлагаемой методики в сравнении с имеющимися в настоящее время алгоритмами решения данной задачи.

9. Применение метода локального поиска для планирования моно- и стереосъемки с использованием поворачиваемого спутника ДЗЗ

В статье [12] представлено описание решения задачи, представленной на соревновании *ROADEF 2003*, в которой было необходимо выполнить планирование съемки ОН одиночным поворачиваемым спутником ДЗЗ для нескольких пользователей с помощью алгоритма многокритериального локального поиска на основе показателей.

Отличительной особенностью данной задачи была необходимость планирования заявок на съемку двух типов: моно и стерео. Для монозапросов съемка проводится однократно, тогда как для стереозапросов каждая область должна быть снята дважды в одном и том же направлении, но под разными углами. Задача оптимизации заключается в том, чтобы максимизировать общую прибыль от проведения съемки и одновременно обеспечить равномерность распределения ресурсов между задачами различных пользователей, которая определяется минимизацией максимальной разницы в прибыли между пользователями.

Оценку результатов работы алгоритма проводили на модифицированных экземплярах тестовых данных из соревнования *ROADEF 2003*, и она показала достаточно высокую эффективность данного подхода в сравнении с алгоритмами, предлагаемыми другими участниками соревнования.

В качестве недостатка описанного подхода можно выделить отсутствие направления поиска в ходе оптимизации, это сильно ограничивает его применение на реальных задачах большой размерности.

10. Генетическая оптимизация для планирования съемок Земли спутниковой группировкой с радиолокаторами

В статье [13] описывается алгоритм планирования работы группировки КА ДЗЗ, оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой.

Отличительной особенностью спутников данного типа является независимость возможности съемки от погодных условий. Оптимизация выполнения операций космической группировки выполнена путем минимизации времени отклика системы, которое определяется как время, которое требуется от момента запроса пользователя на съемку до окончания получения данных. Для решения поставленной задачи предлагается применять алгоритм оптимизации, основанный на генетическом алгоритме.

Результаты исследования полученного решения показывают, что планирование миссии с применением разработанного планировщика приводит к сокращению времени отклика космической системы наблюдения.

11. Мультиагентный метод планирования работы спутниковой группировки ДЗЗ

В статье [14] описывается мультиагентная система планирования съемки ОН группировкой спутников ДЗЗ. В качестве предпосылок для применения мультиагентного подхода для решения данной задачи приводятся преимущества механизмов самоадаптации и самоорганизации относительно многокритериальных задач большой размерности, требующих выполнения динамической адаптации плана при возникновении внештатных событий.

Система разработана на основе инструментария для создания мультиагентных систем *ADELFE*. На основе описания проблемы и инструментов, представляемых *ADELFE*, выделяется девять типов сущностей:

- три типа взаимодействующих агентов: агент задачи, агент полосы съемки и агент КА;
- три типа активных сущностей: облачность, солнечная эфемерида и наземная станция. У данных сущностей отсутствует потребность в удовлетворении своих целей, однако они все же взаимодействуют с активными агентами и оказывают влияние на действия и решения агента;
- три типа пассивных сущностей: память и батарея спутника, а также модуль расчета баллистики. Эти объекты считаются пассив-

ными, потому что они не взаимодействуют с другими сущностями, а представляют собой ресурсы.

Процесс планирования заключается во взаимодействии агентов полосы съемки и агентов КА. При этом агент КА, получив запрос от агента полосы съемки, сообщает ему стоимость размещения, зависящую от необходимости "выталкивания" других запланированных съемок, загрузки памяти, и полученных запросов на съемку в это время. Агенты полосы съемки выбирают самый дешевый вариант. При этом агенты КА могут исключить из расписания другие запланированные операции съемки исходя из их важности, зависящей от приоритета и от числа имеющихся у агента участка вариантов для размещения (чем их меньше, тем более критичен этот участок для этого спутника) — здесь используются эвристики из программирования в ограничениях.

Результаты сравнения разработанной методологии с классическим хронологическим жадным алгоритмом оптимизации, применяемым в настоящее время, показывают преимущества представленной системы.

12. Планирование целевого применения спутниковой группировки ДЗЗ в реальном времени на основе объединения заказов

В статье [15] описывается решение проблемы динамического планирования съемки точечных ОН группировкой из нескольких КА в режиме реального времени. Ключевой особенностью данной задачи является тот факт, что множество всех задач на съемку, выполнение которых необходимо запланировать, неизвестно заранее, а формируется в процессе планирования путем поступления новых заявок.

Для уменьшения размерности задачи планирования авторами статьи предлагается алгоритм слияния вновь поступающих в систему заявок с уже запланированными. Основная идея данного алгоритма основывается на том факте, что КА может одновременно наблюдать несколько расположенных близко друг к другу объектов наблюдения. Таким образом, перед вставкой новой задачи в расписание делается попытка объединения ее с уже запланированной задачей. Объединение нескольких задач в одну возможно при условии одновременной наблюдаемости ОН и непротиворечивости ограничений, накладываемых на каждую из задач. Если объединение задач не удалось, то проводится отдельная вставка новой задачи в расписание.

Результаты исследования разработанного алгоритма показали его эффективность по сравнению с предыдущей версией алгоритма планирования без слияния задач и возможность его использования для динамического планирования в реальном масштабе времени.

13. Иерархический метод решения задачи планирования спутниковой съемки в реальном времени с использованием муравьиной оптимизации

Авторы статьи [16] предлагают решение задачи планирования спутниковой съемки точечных и площадных ОН в режиме реального времени. В качестве основного фактора, влияющего на текущую целевую обстановку, приводится изменение облачности. Учитывая сложность прогнозирования данного фактора, можно констатировать, что традиционные алгоритмы планирования нуждаются в процессе повторного перестроения расписания, которое, в свою очередь, может требовать значительных временных и вычислительных ресурсов, что делает практически невозможным применение данных алгоритмов в режиме реального времени. Также в качестве еще одного недостатка традиционных алгоритмов отмечается отсутствие четкой иерархии между этапами планирования, усложняющее их понимание.

Для решения описанных проблем авторами статьи был разработан иерархический метод планирования. В данном методе процесс планирования предлагается разделить на три этапа: предварительное распределение, грубое планирование и точное планирование. В основу данной иерархической структуры был положен муравьиный алгоритм планирования.

Результаты исследований работы разработанной методики на 36 экспериментальных сценариях показали сокращение времени расчета и отсутствие необходимости полного повторного перестроения расписания при изменении условий планирования, что позволяет сократить затраты вычислительных ресурсов.

14. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников ДЗЗ с использованием мультиагентных технологий

В статье [17] описано решение проблемы построения самоорганизующейся системы управления поведением кластера малых КА, позволяющей проводить автономное планирование исполнения заявок на съемку ОН в соответствии

с пространственно-временными требованиями заказчика. Показано, что данная проблема является сложной и многообразной и в настоящее время находится пока в стадии теоретических исследований и первых попыток построения ее демонстрационных прототипов.

Авторами предлагается новая концепция группового управления КСН, основанная на принципе самоорганизации группового поведения КА. Основная ее идея состоит в том, что все базовые функции процесса управления реализуются непосредственно бортовыми средствами спутников группировки. В работе проводится аналогия между этой задачей и задачей построения самоорганизующихся *B2B*-сетей, являющейся предметом активных исследований и разработок в области многоагентных систем.

Авторы обращают внимание на тот факт, что в работе остались совсем не затронуты некоторые важные проблемы и задачи, которые необходимо решить для возможности практической реализации описанной концепции управления. Первая из них — это проблема построения устойчивой коммуникационной системы. Вторая задача обусловлена динамикой коммуникационной сети, заданной на множестве КА группировки, которая возникает вследствие отсутствия постоянной прямой видимости между КА и ограниченной дальности связи.

Выводы

Сводный перечень выделенных в рассмотренных работах основных задач планирования группировок спутников представлены в таблице.

Обзор приведенных работ показал, что имеющиеся в настоящее время методики планирования работы космических систем имеют централизованный, иерархический и монолитный характер, но в основном опираются не на традиционные математические методы оптимизации, применение которых ведет к лавинообразному росту объемов вычислений, а на различного рода эвристики для сокращения перебора (алгоритм имитации отжига, поиск с запретами, генетический алгоритм и т.д.), точнее, их модификации под конкретную задачу.

В качестве общих недостатков, присущих всем алгоритмам такого рода централизованного планирования, можно выделить следующие:

- отсутствие единой сквозной методологии, позволяющей последовательно наращивать сложность задачи, которая всегда является композицией множества противоречи-

Перечень выделенных основных задач планирования

List of selected main planning tasks

Задача	№ работы													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Планирование работы группировки КА			+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
Планирование работы поворачиваемых КА		+		+				+	+	+		+	+	
Планирование съемки точечных ОН		+		+			+	+	+	+	+	+	+	+
Планирование съемки площадных ОН		+			+								+	
Учет приоритетов запросов	+			+		+		+	+					
Учет использования объемных ресурсов				+			+				+		+	
Учет возможной облачности							+				+		+	
Планирование сеансов связи с НСПИ	+		+	+		+		+		+	+	+		
Динамическое перестроение расписания по событиям											+	+	+	+

вых требований. Например, площадные ОН надо уметь оптимально разбить на фрагменты, но сами размеры этих фрагментов и порядок их съемки зависят от оптимального распределения задач по каждому КА, оптимальных станций сброса данных и т.д.;

- жесткий детерминизм методов и алгоритмов, не позволяющий учитывать ситуационный баланс по разным критериям, предпочтениям и ограничениям, которые могут меняться в ходе ситуации в реальном времени;
- требование по решению конфликтов за счет сетевых взаимодействий: невозможность автоматически запланировать новый заказ в рамках имеющихся ресурсов еще не значит, что такой возможности нет, поскольку можно попытаться выйти на контакт, договориться с собственниками запланированных ранее заказов и попросить их согласиться изменить сроки их заказов, например, за небольшую скидку, которая будет оплачена владельцем нового срочного заказа;
- необходимость скользящей адаптивной локально-оптимальной перестройки плана лишь в той части расписания, которая затронута событием, для учета быстроменяющихся условий реального времени;
- необходимость как можно более поздней окончательной фиксации назначений ресурсов на заказы, чтобы в условиях высокой неопределенности до последнего момента допускать гибкое изменение расписания, с тем чтобы не потерять возможность выполнить пришедшие в последнюю минуту заказы;
- требование управляемых изменений расписания — контроль возможной глубины изменения расписания на основе анализа соотношения ценности возможного искомого

решения против предполагаемых вычислительных затрат с учетом времени, доступно для принятия решений;

- возможность преодоления заданных ограничений в случае, если событие не может быть обработано с учетом имеющихся требований с текущим набором ресурсов — система должна рассматривать возможности выполнения наименее приоритетных заказов с задержками;
- необходимость удобной интерактивной доработки планов, предполагающая, что пользователи всегда должны иметь возможность вручную или полуавтоматически внести изменения и дорабатывать расписания;
- возможность работы в условиях сбоев и поступления неполных или недостоверных данных, ошибок операторов и т.д.

Настоящий обзор показывает, что начали появляться методы и алгоритмы, связанные с учетом семантики предметной области, разбором конфликтов, недетерминированным поведением, самоорганизацией, адаптацией, работой в реальном времени.

На основе анализа основных тенденций рассмотренных разработок можно сделать вывод, что главным свойством интеллектуальных систем будущего для управления космическими системами становится адаптивность, позволяющая повышать эффективность применения целевой аппаратуры в условиях роста сложности, неопределенности и динамики решения поставленных задач, а также обеспечивать для указанных систем оперативность и гибкость, масштабируемость, производительность и надежность в работе, устойчивость развития и живучесть в самых разных ситуациях, с учетом всех ограничений на функционирование

как орбитальной группировки, так и наземного контура управления.

Можно утверждать, что в этом контексте ни одно из решений, предложенных в рассмотренных статьях, не соответствует определенным во введении требованиям по масштабируемости, адаптивности, учету индивидуальных особенностей заявок и ресурсов и гибкости решения. Наиболее близка к решению поставленной задачи методика, предложенная в работе [16], однако авторы выделяют ряд нерешенных проблем, препятствующих применению данной методики на практике.

Предложения по дальнейшим исследованиям

Представляется, что одним из возможных подходов к решению задачи может быть расширенное применение мультиагентных технологий [13,16], позволяющих преодолеть представленные выше недостатки, но требуется значительная работа для их развития с учетом специфики указанной задачи. Следует также отметить перспективы сочетания мультиагентных технологий с технологиями семантического Интернета для формализованного представления знаний, необходимых для учета семантики решаемых задач в ходе автоматического принятия решений, а также возможности их применения и развития для решения различного рода отдельных сложных задач управления ресурсами и их комбинирования [18].

В нашей стране разработка моделей, методов и средств по созданию интеллектуальных систем для управления перспективными группировками КА на основе онтологий и мультиагентных технологий последовательно ведется в работах Самарской школы [19]. Идея разработки "Роя спутников" на основе мультиагентных технологий, способных к автономному принятию решений и взаимодействию между собой для повышения оперативности, гибкости, производительности, надежности и живучести космических систем будущего, была впервые высказана в нашей стране учеником академика С. П. Королева, лауреатом Ленинской премии, проф., д.т.н. А. В. Соллогубом в 2003 г. Полученные теоретические выводы и положения, а также первые результаты экспериментальных разработок и исследований по этому направлению, выполнявшиеся в период с 2010 г., представлены в работах [20–25]. Оставляя пока за рамками обзора эти результаты, отметим, что в настоящее время ведется разработка и первых промышленных систем данного класса.

Развитие предлагаемого подхода с учетом преимуществ и ограничений рассмотренных в настоящей работе методов и средств позволит в перспективе создавать автономные интеллектуальные системы управления группировками КА принципиально нового поколения, построенными по типу "умных (самоорганизующихся) роев", с встроенными способностями к прямому взаимодействию и принятию решений в каждом КА, канале и узле связи. Это предполагает реализацию полного цикла многокритериального ситуационного управления ресурсами в реальном времени, когда интеллектуальная система, ориентируясь на заданные ей цели и критерии их достижения, предпочтения и ограничения, самостоятельно, с учетом особенностей каждой конкретной ситуации, адаптивно решает возникающие задачи распределения заказов, планирования ресурсов, оптимизации их использования, прогнозирования новых событий, мониторинга и контроля результатов, перестройки планов при возникновении расхождения планов и факта, а также извлечения знаний из опыта, т.е. самообучения.

Эта задача представляется чрезвычайно актуальной и значимой для долгосрочного развития всей космической отрасли и требует комплексного ее решения как со стороны планирования целевого применения КА, так и со стороны управления космическим комплексом в целом, с учетом развития спутникового контура управления и организации сетевого непрерывного взаимодействия всех участников, начиная от разработчиков и эксплуатирующей организации космической системы и заканчивая конечными потребителями.

Список литературы

1. Усовик И. В., Дарных В. В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ // Труды МАИ. 2013. № 65. 31 с.
2. Афанасьев И., Кучейко А. Один большой и 103 маленьких. Индия выполнила рекордный по числу полезных нагрузок запуск // Новости космонавтики. 2017. Т. 27, № 4. С. 30–36.
3. Кучейко А. Индийский пуск в интересах ДЗЗ и не только // Новости космонавтики. 2016. Т. 26, № 11. С. 57–58.
4. Karapetyan D., Minic S., Malladi K. T., Punnen A. Satellite downlink scheduling problem: A case study // Omega. 2015. Vol. 53. P. 115–123. DOI: 10.1016/j.omega.2015.01.001.
5. Bunkheila F., Ortore E., Circi C. A new algorithm for agile satellite-based acquisition operations // Acta Astronautica. 2016. Vol. 123. P. 121–128. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.023.
6. Zhang Z., Hu F., Zhang N. Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem // Applied Intelligence. 2018. Vol. 48, Iss. 10. P. 3295–3305. DOI: 10.1007/s10489-018-1144-z.
7. Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., He R. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time // Computers & Operations Research. 2017. Vol. 86. P. 41–53. DOI: 10.1016/j.cor.2017.04.006.

8. Niu X., Tang H., Wu L. Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2018. Vol. 28. P. 813–825. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.013.
9. Luo K., Wang H., Li Y., Li Q. High-performance technique for satellite range scheduling // Computers & Operations Research. 2017. Vol. 85. P. 12–21. DOI: 10.1016/j.cor.2017.03.012.
10. Wang J., Demeulemeester E., Qiu D. A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds // Computers & Operations Research. 2016. Vol. 74. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.cor.2016.04.014.
11. He L., Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., Chen Y. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling // Computers & Operations Research. 2018. Vol. 100. P. 12–25. DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.020.
12. Tangpattanakul P., Jozefowicz N., Lopez P. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite // European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 245. P. 542–554. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.011.
13. Kim H., Chang Y. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 40. P. 17–32. DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.006.
14. Bonnet J., Gleizes M., Kaddoum E., Rainjonneau S., Flandin G. Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System // In Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15). IEEE Computer Society, USA. P. 11–20. DOI: 10.1109/SASO.2015.9.
15. Wang J., Jianjiang Z., Xiaomin Y., Laurence Z., Jiangnan M. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites // Journal of Computer and System Sciences. 2015. Vol. 81, Iss. 1. P. 110–124. DOI: 10.1016/j.jcss.2014.06.016.
16. He L., Liu X., Xing L., Liu K. Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment // Advances in Space Research. 2019. Vol. 63, Iss. 2. P. 897–912. DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.007.
17. Городецкий В. И., Карсаев О. В. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. № 2 (187). С. 234–247.
18. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. London-Boston: WIT Press, 2014. 202 p.
19. Скобелев П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33–46.
20. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Иващенко А. В., Симонова Е. В., Степанов М. Е., Царев А. В. Решение задач дистанционного зондирования Земли с применением мультиагентных технологий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". 2010. № 7 (28). С. 47–54.
21. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е. Модели сетевых задач планирования и управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов при решении задач дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1(56). С. 34–38.
22. Соллогуб А. В., Скобелев П. О., Симонова Е. В., Царев А. В., Степанов М. Е., Жилев А. А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 16–26.
23. Belokonov I., Skobelev P., Simonova E., Travin V., Zhilyaev A. Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations // Procedia Engineering: Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites. 2015. № 104. P. 118–130. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.103.
24. Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V. Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing // In: Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., McFarlane D. (eds) Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence. 2016. Vol. 640. P. 309–317. DOI: 10.1007/978-3-319-30337-6_28.
25. Skobelev P. O., Lakhin O. I. Towards the digital platform and smart services for managing space traffic // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. 2018. Vol. 13, № 2. P. 187–198. DOI: 10.2495/DNE-V13-N2-187-198.

A Review of Modern Methods for Planning and Scheduling of the Operations in Advanced Space Systems

V. A. Galuzin¹, vladimir.galuzin@gmail.com, A. Yu. Kutomanov², kutomanov@mcc.rsa.ru,
M. M. Matyushin², MatyushinMM@tsniimash.ru, P. O. Skobelev^{3,4}, petr.skobelev@gmail.com,
¹Samara State Technical University, Samara, 443001, Russian Federation,
²JSC "TsNIIMash", Korolev, Moscow Region, 141070, Russian Federation,
³Samara Federal Research Scientific Centre RAS, Samara, 443001, Russian Federation,
⁴Institute for the Control of Complex Systems RAS, Samara, 443020, Russian Federation

*Corresponding author: Skobelev Petr O., Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory "Multi-agent systems",
Samara Federal Research Scientific Centre RAS, Institute for the Control of Complex Systems RAS
Samara, 443001, Russian Federation, e-mail: petr.skobelev@gmail.com*

Accepted on May 27, 2020

Abstract

The paper gives overview of modern research on planning and scheduling of new generation of large groups of satellites, analyzes current methods and algorithms of planning and scheduling, considers their practical applications and main future trends. The list of requirements for developing new methods and algorithms for planning and scheduling is identified. The problem statement is formulated which shows multi-objective complexity of planning and scheduling for groups of satellites. A number of conflicting requirements are identified generated by demands and resources, including fast changing meteorological parameters, ballistic constraints, video cameras restrictions, satellite battery constraints, ground stations and communication lines requirements, etc. It is shown that the main part of developed methods and tools is still oriented on centralized control of resources and based on different heuristics for reducing exhausted combinatorial search of globally optimal options. These methods and tools do not consider networking nature of new generation of satellites groups which requires negotiations and conflict solving among orders and satellites in future. These new generation of satellites groups also requires high adaptability and flexibility, individuality, scalability, performance and reliability of future groups of satellites. One of new trends in adaptive planning and scheduling is multi-agent technology where agents of demands and

resource can make matching on virtual market. But it requires new efforts not only on new generation software developments for designing open self-organized systems ("swarms of satellites") but also on direct communication between satellites and ground stations. Developing such smart swarms of satellites will provide new features, benefits and values for customers.

Keywords: space system, satellite, ground station, observation objects, communication sessions, planning methods, adaptive planning, multi-agent technology

Acknowledgements: The paper has been prepared based on the materials of scientific research within the subsidized state theme of the Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute for the Control of Complex Systems RAS for research and development on the topic: № AAAA-A19-119030190053-2 «Research and development of methods and means of analytical design, computer-based knowledge representation, computational algorithms and multi-agent technology in problems of optimizing management processes in complex systems».

For citation:

Galuzin V. A., Kutomanov A. Yu., Matyushin M. M., Skobelev P. O. A Review of Modern Methods for Planning and Scheduling of the Operation in Advanced Space Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 639–650.

DOI: 10.17587/mau.21.639-650

References

1. Usovik I. V., Darnopykh V. V. Automated software package for parametric analysis and optimization of planning the target functioning of remote sensing space systems, *Trudy MAI*, 2013, no. 65, p. 31 (in Russian).
2. Afanasyev I., Kucheyko A. One large and 103 small. India completed a record-breaking launch of payloads, *Novosti Kosmonavтики*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 30–36 (in Russian).
3. Kucheyko A. Indian launch in the interests of remote sensing and not only, *Novosti Kosmonavтики*, 2017, vol. 26, no. 11, pp. 57–58 (in Russian).
4. Karapetyan D., Minic S., Malladi K. T., Punnen A. Satellite downlink scheduling problem: A case study, *Omega*, 2015, vol. 53, pp. 115–123, DOI: 10.1016/j.omega.2015.01.001.
5. Bunkheila F., Ortore E., Circi C. A new algorithm for agile satellite-based acquisition operations, *Acta Astronautica*, 2016, vol. 123, pp. 121–128, DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.023.
6. Zhang Z., Hu F., Zhang N. Ant colony algorithm for satellite control resource scheduling problem, *Applied Intelligence*, 2018, vol. 48, iss. 10, pp. 3295–3305, DOI: 10.1007/s10489-018-1144-z.
7. Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., He R. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time, *Computers & Operations Research*, 2017, vol. 86, pp. 41–53, DOI: 10.1016/j.cor.2017.04.006.
8. Niu X., Tang H., Wu L. Satellite Scheduling of Large Areal Tasks for Rapid Response to Natural Disaster Using a Multi-Objective Genetic Algorithm, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, vol. 28, pp. 813–825, DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.02.013.
9. Luo K., Wang H., Li Y., Li Q. High-performance technique for satellite range scheduling, *Computers & Operations Research*, 2017, vol. 85, pp. 12–21, DOI: 10.1016/j.cor.2017.03.012.
10. Wang J., Demeulemeester E., Qiu D. A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds, *Computers & Operations Research*, 2016, vol. 74, pp. 1–13, DOI: 10.1016/j.cor.2016.04.014.
11. He L., Xiaolu L., Laporte G., Chen Y., Chen Y. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling, *Computers & Operations Research*, 2018, vol. 100, pp. 12–25, DOI: 10.1016/j.cor.2018.06.020.
12. Tangpattanakul P., Jozefowicz N., Lopez P. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite, *European Journal of Operational Research*, 2015, vol. 245, pp. 542–554, DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.011.
13. Kim H., Chang Y. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time, *Aerospace Science and Technology*, 2015, vol. 40, pp. 17–32, DOI: 10.1016/j.ast.2014.10.006.
14. Bonnet J., Gleizes M., Kaddoum E., Rainjonneau S., Flandin G. Multi-satellite Mission Planning Using a Self-Adaptive Multi-agent System, *In Proceedings of the 2015 IEEE 9th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO '15)*. IEEE Computer Society, USA, pp. 11–20, DOI: 10.1109/SASO.2015.9.
15. Wang J., Jianjiang Z., Xiaomin Y., Laurence Z., Jiangnan M. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites, *Journal of Computer and System Sciences*, 2015, vol. 81, iss. 1, pp. 110–124, DOI: 10.1016/j.jcss.2014.06.016.
16. He L., Liu X., Xing L., Liu K. Hierarchical scheduling for real-time agile satellite task scheduling in a dynamic environment, *Advances in Space Research*, 2019, vol. 63, iss. 2, pp. 897–912, DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.007.
17. Gorodetsky V. I., Karsaev O. V. Self-organization of group behavior of a cluster of small satellites of a distributed observation system, *Izvestiya Yuzhnogo Federalnogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*, 2017, no. 2, pp. 234–247 (in Russian).
18. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity, London-Boston, WIT Press, 2014, 202 p.
19. Skobelev P. O. Multi-agent technology in industrial applications: Towards 20-th anniversary of multi-agent technology research team in Samara, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 33–46 (in Russian).
20. Sollogub A. V., Skobelev P. O., Ivashchenko A. V., Simonova E. V., Stepanov M. E., Tsarev A. V. Solving Earth Remote Sensing Problems Using Multi-Agent Technologies, *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2010, no.7 (28), pp. 47–54 (in Russian).
21. Sollogub A. V., Skobelev P. O., Simonova E. V., Tsarev A. V., Stepanov M. E. Simulation models for network-centric problems of scheduling and group operational control of a cluster of small space ships and mini-satellites in the Earth remote sensing problems, *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2012, no. 1(56), pp. 34–38 (in Russian).
22. Sollogub A. V., Skobelev P. O., Simonova E. V., Tsarev A. V., Stepanov M. E., Zhilyaev A. A. Intelligent system for distributed control of group operations of a cluster of small spacecrafts in Earth remote sensing problems, *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 1(62), pp. 16–26 (in Russian).
23. Belokonov I., Skobelev P., Simonova E., Travin V., Zhilyaev A. Multiagent planning of the network traffic between nanosatellites and ground stations, *Procedia Engineering: Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites*, 2015, no. 104, pp. 118–130, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.103.
24. Skobelev P., Simonova E., Zhilyaev A., Travin V. Multi-Agent Planning of Spacecraft Group for Earth Remote Sensing, *In: Borangiu T., Trentesaux D., Thomas A., McFarlane D. (eds) Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence*, 2016, vol. 640, pp. 309–317, DOI: 10.1007/978-3-319-30337-6_28.
25. Skobelev P. O., Lakhin O. I. Towards the digital platform and smart services for managing space traffic, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 187–198, DOI: 10.2495/DNE-V13-N2-187-198.

Е. М. Воронов¹, д-р техн. наук, проф., А. А. Карпунин¹, канд. техн. наук, доц., ksans@yandex.ru,
М. В. Палкин², канд. техн. наук, помощник ген. директора, mpalkin@vpk.npomash.ru,
И. П. Титков¹, аспирант, titkov.ivan.bmstu@gmail.com,
¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва
² АО "ВПК "НПО машиностроения", г. Реутов

Оптимальное управление относительным движением группы космических аппаратов

Рассмотрена задача оптимального управления относительным движением группы (пары) космических аппаратов (КА), которая сформулирована в виде задачи Лагранжа на основе критерия минимизации расхода управляющих ускорений, соответствующего минимизации расхода рабочего тела или удельного импульса тяги. На основе уравнений Хилла—Клохесси—Уилтишера получена математическая модель относительного пространственного движения пары КА, находящейся на круговой орбите вокруг центрального тела. При этом один из них является управляемым, а другой — неуправляемым КА. Проведено аналитическое описание управления движением такой пары КА. Сформулирован критерий оптимальности, который определяет минимизацию расхода управляющих ускорений КА для решения задачи с заданными граничными условиями на фиксированном интервале времени. Получена система уравнений Эйлера—Лагранжа как необходимое условие существования экстремума. Получено аналитическое решение задачи Лагранжа. Для исследования полученного решения выполнено моделирование относительного движения КА по дистанции, относительной высоте, боковому отклонению для четырех временных интервалов, равных половине витка, одному, двум и четырем виткам. Исследовано влияние располагаемого времени (длительности) маневра КА на значение потребных максимальных управляющих ускорений и форму траекторий. Определена зависимость заданного критерия оптимальности управления от длительности маневра. Показано, что с увеличением длительности маневра уменьшаются суммарные затраты управляющих ускорений КА и максимальное значение управляющих ускорений. Показано изменение формы оптимальных траекторий и, соответственно, программного закона управления КА с увеличением длительности маневра. Обсуждается практическое применение полученных результатов. На основе аналитического решения предложен алгоритм синтеза управляющих ускорений КА, содержащий этапы определения начального относительного положения КА; определения потребного относительного положения КА; определения желаемой длительности маневра; вычисления значений постоянных интегрирования с учетом начального и желаемого состояний и длительности маневра КА; синтеза оптимальных управляющих ускорений и траекторий КА с использованием полученного аналитического решения.

Ключевые слова: оптимальное управление, космический аппарат, относительное движение, задача Лагранжа, минимизация расхода, аналитическое решение

Введение

В связи с активным развитием техники и информационных технологий разрабатываются новые концепции спутниковых систем. Одной из них является система автоматических космических аппаратов (КА) группового полета, летящих на сравнительно близком взаимном расстоянии (от сотен метров до сотен километров) и функционирующих как единое целое. Этой тематике за последнее десятилетие посвящен цикл работ [1—4]. При решении задач группового полета возможно выделить несколько подходов к управлению движением КА группы, используемых на различных этапах функционирования и для решения целевых задач: активное управление на этапе формирования заданной орбитальной конфигурации; коррекция параметров движения КА для сохранения периодической конфигурации;

непрерывное управление для поддержания текущих параметров конфигурации [3, 5—12]. При этом для обеспечения безопасного (без столкновения) полета требуются алгоритмы быстрого расчета траекторий относительного движения КА в группе [1, 3, 5, 8, 11]. В связи с этим практический интерес представляют подходы на основе теории оптимального управления, обеспечивающие получение таких решений [13—18].

Целью данной работы является получение аналитического решения для расчета параметров оптимальных траекторий относительного движения пары КА по критерию минимизации расхода управляющих ускорений путем решения соответствующей задачи Лагранжа (с заданными граничными условиями на фиксированном интервале времени) с последующим моделированием и анализом результатов.

Аналитическое описание управления движением пары космических аппаратов

Рассматривается относительное движение управляемого аппарата относительно неуправляемого, находящегося на круговой орбите вокруг центрального тела. Введем следующую систему координат: ось x направлена вдоль радиус-вектора неуправляемого КА, ось z — вдоль вектора орбитального углового момента, ось y дополняет оси до правой тройки векторов.

Система уравнений относительного пространственного движения пары КА с одним управляемым аппаратом в нормальной форме Коши имеет вид [19-20]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = 3n^2x_1 + 2nx_4 + u_1; \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 = -2nx_2 + u_2; \dot{x}_5 = x_6; \dot{x}_6 = -n^2x_5 + u_3, \end{cases} \quad (1)$$

где $n = \sqrt{\mu/a^3}$; μ — гравитационный параметр; a — длина большой полуоси эллипса или радиус круговой орбиты неуправляемого КА; x_1 — относительное расстояние между КА по высоте; x_2 — скорость изменения относительного расстояния между КА по высоте; x_3 — относительное расстояние между КА по дистанции; x_4 — скорость изменения относительного расстояния между КА по дистанции; x_5 — относительное расстояние между КА по фронту; x_6 — скорость изменения относительного расстояния между КА по фронту; u_i , $i = 1, 3$, — нормальная, тангенциальная и бинормальная составляющие управляющего ускорения управляемого КА, соответственно.

Пусть объект управления — управляемый КА — требуется перевести из начального состояния $\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}^0$ в произвольное состояние $\mathbf{X}(t_1) = \mathbf{X}^{t_1}$ таким образом, чтобы обеспечить минимум расхода управляющих ускорений:

$$J = \int_0^{t_1} (u_1^2(t) + u_2^2(t) + u_3^2(t)) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

где t_1 — фиксированная длительность маневра.

Для решения задачи Лагранжа управления относительным пространственным движением управляемого КА запишем Лагранжиан для критерия (2):

$$\begin{aligned} L = & \lambda_0(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) + \lambda_1(\dot{x}_1 - x_2) + \\ & + \lambda_2(\dot{x}_2 - 3n^2x_1 - 2nx_4 - u_1) + \lambda_3(\dot{x}_3 - x_4) + \\ & + \lambda_4(\dot{x}_4 + 2nx_2 - u_2) + \lambda_5(\dot{x}_5 - x_6) + \\ & + \lambda_6(\dot{x}_6 + n^2x_5 - u_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Для задачи минимизации коэффициент Лагранжа $\lambda_0 = 1$. Расширенный вектор переменных имеет следующий вид: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, u_1, u_2, u_3$.

Система уравнений Эйлера—Лагранжа имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \dot{x}_2 = 3n^2x_1 + 2nx_4 + u_1; \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 &= -2nx_2 + u_2; \dot{x}_5 = x_6; \dot{x}_6 = -n^2x_5 + u_3; \\ \dot{\lambda}_1 &= -3\lambda_2n^2; \dot{\lambda}_2 = 2\lambda_4n - \lambda_1; \dot{\lambda}_3 = 0; \\ \dot{\lambda}_4 &= -2\lambda_2n - \lambda_3; \dot{\lambda}_5 = \lambda_6n^2; \dot{\lambda}_6 = -\lambda_5; \\ -\lambda_2 + 2u_1 &= 0; -\lambda_4 + 2u_2 = 0; -\lambda_6 + 2u_3 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Управляющие ускорения, выраженные через неопределенные функции Лагранжа, можно записать в виде

$$u_1 = 0,5\lambda_2, u_2 = 0,5\lambda_4, u_3 = 0,5\lambda_6, \quad (5)$$

Необходимо решить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = 3n^2x_1 + 2nx_4 + 0,5\lambda_2; \dot{x}_3 = x_4; \\ \dot{x}_4 = -2nx_2 + 0,5\lambda_4; \dot{x}_5 = x_6; \dot{x}_6 = -n^2x_5 + 0,5\lambda_6; \\ \dot{\lambda}_1 = -3\lambda_2n^2; \dot{\lambda}_2 = 2\lambda_4n - \lambda_1; \dot{\lambda}_3 = 0; \\ \dot{\lambda}_4 = -2\lambda_2n - \lambda_3; \dot{\lambda}_5 = \lambda_6n^2; \dot{\lambda}_6 = -\lambda_5. \end{cases} \quad (6)$$

Вектор неопределенных функций Лагранжа λ имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\frac{9}{4}(C_1 \cos(nt) + C_2 \sin(nt)) + 6n(C_3 + C_6t); \\ \lambda_2 &= -\frac{3}{4n}(C_1 \sin(nt) - C_2 \cos(nt)) - \frac{2}{n}C_6; \\ \lambda_3 &= C_6; \\ \lambda_4 &= -\frac{3}{2n}(C_1 \cos(nt) + C_2 \sin(nt)) + 3(C_3 + C_6t); \\ \lambda_5 &= -\frac{1}{2}(C_4 \sin(nt) - C_5 \cos(nt)); \\ \lambda_6 &= -\frac{1}{2n}(-C_4 \cos(nt) + C_5 \sin(nt)). \end{aligned} \quad (7)$$

Интегрирование системы (1) с учетом выражений (5) и (7) с граничными условиями $\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}^0$ и $\mathbf{X}(t_1) = \mathbf{X}^{t_1}$ позволяет получить следующее аналитическое решение:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \frac{3C_6 t^2}{2n} - \frac{64C_6 - 15C_2 f_c + 24C_1 f_s - 64C_{10} n^3 + 24C_8 n^3 f_c - 24C_9 n^3 f_s}{16n^3} + \frac{t(48C_3 n^2 + 15C_1 n f_c + 15C_2 n f_s)}{16n^3}; \\
x_2 &= \frac{3(16C_3 n - 3C_1 f_c + 8C_9 n^3 f_c + 8C_8 n^3 f_s + 16C_6 n t + 5C_2 n t f_c - 5C_1 n t f_s)}{16n^2}; \\
x_3 &= -\frac{1}{8n^3} (33C_1 f_c - 48C_3 n + 24C_2 f_s + 48C_7 n^4 - 24C_9 n^3 f_c - 24C_8 n^3 f_s) + \\
&+ \frac{1}{8n^3} (18C_3 n^3 t^2 + 6C_6 n^3 t^3 - 64C_6 n t + 48C_{10} n^4 t - 15C_2 n t f_c + 15C_1 n t f_s); \\
x_4 &= -\frac{1}{8n^2} (9C_2 f_c - 64C_6 - 18C_1 f_s + 48C_{10} n^3 - 24C_8 n^3 f_c + 24C_9 n^3 f_s) - \\
&- \frac{1}{8n^2} (18C_6 n^2 t^2 + 36C_3 n^2 t + 15C_1 n t f_c + 15C_2 n t f_s); \\
x_5 &= -\frac{1}{16n^3} (C_4 f_c + C_5 f_s - 8C_{12} n^3 f_c + 8C_{11} n^3 f_s - 2C_3 n t f_c + 2C_4 n t f_s); \\
x_6 &= -\frac{1}{16n^2} (C_4 f_s - C_5 f_c + 8C_{11} n^3 f_c + 8C_{12} n^3 f_s + 2C_4 n t f_c + 2C_5 n t f_s); \\
u_1 &= \frac{1}{8n} (3C_2 f_c - 3C_1 f_s) - \frac{C_6}{n}, \quad u_2 = \frac{3C_3}{2} + \frac{3}{2} C_6 t - \frac{3}{4n} (C_1 f_c - C_2 f_s), \\
u_3 &= -\frac{1}{4n} (C_4 f_c + C_5 f_s), \quad f_c = \cos(nt), \quad f_s = \sin(nt).
\end{aligned} \tag{8}$$

Постоянные интегрирования C_i могут быть найдены путем назначения граничных условий с последующим решением полученной системы уравнений.

Исследование аналитического решения

Исследование выполнено для аналитического решения (8) со следующими исходными данными: $\mu = 398\,600 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2$, высота круговой орбиты $a = 530 \text{ км}$.

В качестве модельного примера рассматривается задача относительного перемещения управляемого КА на 2000 м по дистанции, относительной высоте, боковому отклонению:

$$\mathbf{X}^0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T;$$

$$\mathbf{X}^{t_1} = (2000, 0, 2000, 0, 2000, 0)^T.$$

Для оценки влияния длительности маневра на относительное движение пары КА выполняется моделирование для четырех временных интервалов, равных половине витка, одному витку, двум и четырем виткам:

$$\begin{aligned}
T_1 &= \left\{ t_1 : \frac{2\pi}{n} \cdot \frac{1}{2}, \frac{2\pi}{n}, 2 \cdot \frac{2\pi}{n}, 4 \cdot \frac{2\pi}{n} \right\} \approx \\
&\approx \{2834, 5668, 11336, 22672\}, \text{ с.}
\end{aligned}$$

На рис. 1–4 (см. третью сторону обложки) и рис. 5, 6 (см. четвертую сторону обложки) пред-

ставлены результаты моделирования решения поставленной задачи для относительных расстояний по высоте, дистанции и фронту (x_1, x_3, x_5) и трех управляющих ускорений u_1, u_2, u_3 , соответствующих нормальной, тангенциальной и бинормальной составляющим импульса тяги. Для практической реализации таких ускорений необходима двигательная установка, обеспечивающая независимое создание управляющих ускорений в трех плоскостях (например, ионные двигатели или реактивные двигатели с дросселируемой малой тягой).

На рис. 7 представлена зависимость оптимального значения критерия оптимальности (2) от длительности маневра t_1 . С увеличением длительности маневра уменьшаются суммарные затраты управляющих ускорений.

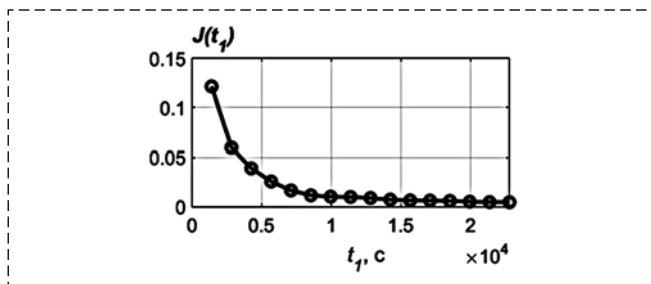


Рис. 7. Зависимость суммы квадратов ускорений от длительности маневра

Fig. 7. The dependence of the sum of the squares of accelerations on the duration of the maneuver

На рис. 8 (см. четвертую сторону обложки) представлена зависимость максимального значения управляющих ускорений u_1 , u_2 , u_3 от длительности маневра. Как видно, с увеличением длительности маневра уменьшается максимальное значение управляющих ускорений.

Особенностью траекторий, представленных на рис. 1—6 (см. третью и четвертую стороны обложки), является изменение оптимальных траекторий и, соответственно, программного закона управления с увеличением длительности маневра: происходит увеличение числа пересечений траекторий неуправляемого и управляемого КА. Это связано с особенностью динамики орбитального движения и рассматриваемой модели, основанной на уравнениях Клохесси—Уилтшира.

Преимуществом аналитического решения задачи оптимального управления перед методами параметрической оптимизации и численными методами решения краевых задач является его однозначность и низкая вычислительная сложность, которая сводится к вычислению значения функций при заданных граничных условиях. На основе аналитического решения может быть предложен алгоритм синтеза управляющих ускорений, включающий этапы: 1) определения начального относительного положения КА; 2) определение потребного относительного положения КА; 3) определение желаемой длительности маневра; 4) вычисление значений постоянных интегрирования с учетом начального и желаемого состояний и длительности маневра; 5) синтез оптимальных управляющих ускорений и траекторий с использованием полученного аналитического решения.

Заключение

Получено аналитическое решение задачи управления относительным движением пары КА, определяющее оптимальное управление по критерию минимизации расхода управляющих ускорений. Практической значимостью этой задачи является экономия рабочего тела двигательной установки при маневре КА. Решение применимо для группы двух и более управляемых КА.

Список литературы

1. Воронов Е. М., Карпунин А. А., Палкин М. В. и др. Формирование конфигурации группы спутников и многокритериальное управление по конфигурационной точности и расходу // Труды XXXVIII академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2014, под общей редакцией А. К. Мед-

ведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2014. 418 с.

2. Палкин М. В. Некоторые аспекты формирования групп космических аппаратов и управления ими // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 29—35.

3. Титков И. П. Алгоритм формирования оптимальных периодических структур по критерию безопасности и точности // Электронный журнал "Молодежный научно-технический вестник". 2015. № 12. 7 с. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/825956.html>.

4. Палкин М. В., Титков И. П. Управление маневрами космических аппаратов группового полета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. № 20(5). С. 308—313. DOI:10.17587/mau.20.308-313.

5. Scharf D. P., Hadaegh F. Y., Ploen S. R. A survey of spacecraft formation flying guidance and control. Part II: control // Proceedings of the 2004 American Control Conference, Boston, MA, USA. 2004. Vol. 4. P. 2976—2985.

6. Аверкиев Н. Ф., Власов С. А., Житников Т. А. и др. Формирование структуры баллистически связанной группы космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8, № 4. С. 11—16.

7. Назаров А. Е. Управление относительным движением космических аппаратов при организации тандемной схемы полета // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2018. № 1. С. 19—29.

8. Koenig A., D'Amico S. Safe spacecraft swarm deployment and acquisition in perturbed near-circular orbits subject to operational constraints // Acta Astronautica. No. 153. 2018. DOI:10.1016/j.actaastro.2018.01.037.

9. Schlanbusch R., Kristiansen R., Nicklasson P. Spacecraft formation reconfiguration with collision avoidance // Automatica. No. 47. 2011. DOI:10.1016/j.automatica.2011.02.014.

10. Овчинников М. Ю. Динамика и управление перспективными многоэлементными орбитальными системами // Вестник ННГУ. 2011. № 4-2. 3 с.

11. Jianqiao Z., Ye D., Biggs J., Sun Z. Finite-time relative orbit-attitude tracking control for multi-spacecraft with collision avoidance and changing network topologies // Advances in Space Research. 2018. N. 63. 21 p. DOI:10.1016/j.asr.2018.10.037.

12. Mauro G. Di, Bevilacqua R., Spiller D., Sullivan J., D'Amico S. Continuous maneuvers for spacecraft formation flying reconfiguration using relative orbit elements // Acta Astronautica. 2018. N. 153. P. 311—326. DOI:10.1016/j.actaastro.2018.01.043.

13. Гончаревский В. С. Оптимальное непрерывное управление взаимным маневром космических аппаратов без ограничений на вид траектории в орбитальной относительной системе координат // Информация и Космос. 2016. № 1. С. 143—147.

14. Franzini G., Tannous M., Innocenti M. Spacecraft relative motion control using the state-dependent Riccati equation technique. // 10th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems. 29 May — 2 June 2018. Salzburg, Austria. 15 p.

15. Yunjun X., Fitz-Coy N. G., Lind R., Tatsch A. m Control for Satellites Formation Flying // Journal of Aerospace Engineering — J AEROSP ENG. 2007. N. 20. DOI:10.1061/(ASCE)0893-1321(2007)20:1(10).

16. William Wiesel. Optimal Impulsive Control of Relative Satellite Motion // Journal of Guidance Control and Dynamics. 2003. 26(1). P. 74—78. DOI: 10.2514/2.5016

17. Ulybyshev Y. Long-Term Formation Keeping of Satellite Constellation Using Linear-Quadratic Controller // Journal of Guidance Control and Dynamics. N. 21(1). P. 109—115. DOI: 10.2514/2.4204.

18. Sedwick R. J., Miller D., Kong E. Mitigation of Differential Perturbations in Clusters of Formation Flying Satellites // AIAA/AAS Space Flight Mechanics Conference. Breckenridge, Colorado. 1999. V. 102, Part. 1. AAS99—124. P. 323—342.

19. Clohessy, W. H., Wiltshire, R. S. Terminal Guidance for Satellite Rendezvous // J. Aerospace Sciences. 1960. Vol. 27, N. 9. P. 653—678.

20. Иванов Н. М., Лысенко Л. Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. Изд. 3. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 528 с

Satellite Formation Flying Maneuver Optimal Control

E. M. Voronov¹, A. A. Karpunin¹, ksans@yandex.ru,

M. V. Palkin², Assistant General Director, mpalkin@vpk.npomash.ru, I. P. Titkov¹, titkov.ivan.bmstu@gmail.com,

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,

²MIC "NPO Mashinostroyenia", 143966, Reutov, Russian Federation

Corresponding author: Palkin Maksim V., Ph.D., Assistant General Director MIC "NPO Mashinostroyenia", Reutov, 143966, Russian Federation, e-mail: mpalkin@vpk.npomash.ru,

Accepted on April 20, 2020

Abstract

A task of a pair formation flying satellites optimal relative motion control is described. It is presented as a Lagrange problem of satellite relative motion by the criterion of the control acceleration minimization. The control acceleration term corresponds to the term of a fuel flow or a satellite specific impulse. On the basis of a Hill-Clohessy-Wiltshire equation a mathematical model of the relative motion of a pair of satellites is obtained. One satellite is controlled and another is noncontrolled. Analytical description of such relative motion is presented. The optimization criterion considers control acceleration minimization with fixed boundary conditions and a fixed time interval. The system of Euler-Lagrange equations is obtained as a necessary condition for the extremum existence. An analytical solution for the Lagrange problem is obtained. Relative motion simulation for given examples is performed. The example studies relative motion by distance, relative attitude and lateral deviation parameters and four time intervals, corresponding to half orbit length, one, two and four orbit length. The correlation of optimization criterion value and duration of the maneuver is determined. Direct dependence between duration of maneuvers, control acceleration magnitude and control acceleration costs is presented. Correlation between duration of maneuvers and shape of the optimal trajectory is studied. Practical application of this paper results is discussed. An algorithm of a formation flying relative motion control is provided. The algorithm includes stages of an initial relative position definition, the required relative position and duration of a maneuver definition, constants of integration evaluation, optimal control acceleration synthesis.

Keywords: satellite, relative motion, optimal control, fuel minimization, analytical solution, Lagrange problem, formation flying

For citation:

Voronov E. M., Karpunin A. A., Palkin M. V., Titkov I. P. Satellite Formation Flying Maneuver Optimal Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 651–655.

DOI: 10.17587/mau.21.651-655

References

1. Voronov E. M., Karpunin A. A., Palkin M. V. Formation flying configuration design and multi-criteria control, *Proceedings of the XXXVIII academic conference on Cosmonautics*, Moscow, RAS Commission on the scientific heritage pioneers of space exploration, 2014, 418 p. (in Russian).
2. Palkin M. V. Questions of satellite formation flying design and control, *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 29–35 (in Russian).
3. Titkov I. P. Algorithm for the formation of optimal periodic structures by the criterion of safety and accuracy, *Youth Scientific and Technical Bulletin*, 2015, no. 12, 7 p., available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/825956.html> (in Russian).
4. Palkin M. V., Titkov I. P. Satellite Formation Flying Maneuver Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 308–313 (in Russian), DOI:10.17587/mau.20.308-313.
5. Scharf D. P., Hadaegh F. Y., Ploen S. R. A survey of spacecraft formation flying guidance and control. Part II: control, *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, MA, USA, 2004, vol. 4, pp. 2976–2985.
6. Averkiev N. F., Vlasov S. A., Zhitnikov T. A. and others. Formation of structure ballistically linked group of remote sensing spacecrafts, *High tech in Earth Space Research*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 11–16 (in Russian).
7. Nazarov A. E. Control of apparent SC motion at Tandem Mission Profile, *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina*, 2018, no. 1, pp. 19–29. (in Russian)
8. Koenig A. D'Amico S. Safe spacecraft swarm deployment and acquisition in perturbed near-circular orbits subject to operational constraints, *Acta Astronautica*, 2018, no. 153, DOI:10.1016/j.actaastro.2018.01.037.
9. Schlanbusch R., Kristiansen R., Nicklasson P. Spacecraft formation reconfiguration with collision avoidance, *Automatica*, 2011, no. 47, DOI:1443–1449. 10.1016/j.automatica.2011.02.014.
10. Ovchinnikov M. Y. Dynamics and control of promising single-element orbital systems, *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4–2, 3 p. (in Russian).
11. Jianqiao Z., Ye D. Biggs J. Sun Z. Finite-time relative orbit-attitude tracking control for multi-spacecraft with collision avoidance and changing network topologies, *Advances in Space Research*, 2018, no. 63, 21 p, DOI:10.1016/j.asr.2018.10.037.
12. Mauro G. Di, Bevilacqua R., Spiller D., Sullivan J., D'Amico S. Continuous maneuvers for spacecraft formation flying reconfiguration using relative orbit elements, *Acta Astronautica*, 2018, no. 153, pp. 311–326, DOI:10.1016/j.actaastro.2018.01.043.
13. Goncharevsky V. Optimal continuous control of mutual spacecraft maneuvering without restrictions on type of trajectory in orbital relative coordinate system, *Information and Space*, 2016, no. 1, pp. 143–147 (in Russian).
14. Franzini G., Tannous M., Innocenti M. Spacecraft relative motion control using the state-dependent Riccati equation technique, *10th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems*, 29 May – 2 June 2018, Salzburg, Austria, 15 p.
15. Yunjun X., Fitz-Coy N. G., Lind R., Tatsch A. m Control for Satellites Formation Flying, *Journal of Aerospace Engineering – J AEROSP ENG.*, 2007, no. 20, DOI:10.1061/(ASCE)0893-1321(2007)20:1(10).
16. William Wiesel. Optimal Impulsive Control of Relative Satellite Motion, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2003, 26(1), pp. 74–78, DOI: 10.2514/2.5016.
17. Ulybyshev Y. Long-Term Formation Keeping of Satellite Constellation Using Linear-Quadratic Controller, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, no. 21(1), pp. 109–115, DOI: 10.2514/2.4204.
18. Sedwick R. J., Miller D., Kong E. Mitigation of Differential Perturbations in Clusters of Formation Flying Satellites, *AIAA/AAS Space Flight Mechanics Conference*, Breckenridge, Colorado, 1999, vol. 102, part. 1, AAS99–124, pp. 323–342.
19. Clohessy W. H., Wiltshire R. S. Terminal Guidance for Satellite Rendezvous, *J. Aerospace Sciences*, 1960, vol. 27, no. 9, pp. 653–678.
20. Ivanov N. M., Lysenko L. N. Spacecraft ballistics and navigation. Ed. 3, Moscow, MSTU named after N. E. Bauman, 2016, 528 p. (in Russian).

A. A. Kulik, kulikalekse@yandex.ru,
Moscow Power University, Moscow, 111250, Russian Federation

Corresponding author: **Kulik Aleksey A.**, Cand. Sc., Moscow Power University,
Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: kulikalekse@yandex.ru

Accepted on August 05, 2020

Development of a Method for Computation of Aircraft Safety Control Signal

Abstract

The optimal flight safety management of an aircraft is considered, on the basis of which the signal for parrying the threat of an aviation accident is calculated. In the process of analyzing the factors affecting the flight safety of the aircraft, the psychophysical state of the crew, the serviceability of the aircraft's onboard equipment and the flight weather conditions are separated into separate groups. Based on the performed analysis, a target function of aircraft flight safety management is proposed in the form of a maximum, which is provided by the output signal of the aircraft flight safety management system. The calculation of the control signal is based on a count state of the flight conditions of the aircraft, which allows us to estimate the causal relationship of the factors of threat of the accident, and to determine the control signal with the safety of the vessel. In the course of this work, an algorithm for calculating the aircraft safety control signal has been developed. The results obtained during the work can be used for software and hardware implementation of aircraft flight safety management systems, as well as for the design of systems and complexes of its onboard equipment.

Keywords: safety control systems of flight, optimal control, aviation accident, control signal, state graph

For citation:

Kulik A. A. Development of a Method for Computation of Aircraft Safety Control Signal, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 11, pp. 656—662.

DOI: 10.17587/mau.21.656-662

УДК 004.324

DOI: 10.17587/mau.21.656-662

А. А. Кулик, канд. техн. наук, kulikalekse@yandex.ru
НИУ "МЭИ", Москва

Разработка метода определения сигнала управления безопасностью полета воздушного судна

Рассматривается оптимальное управление безопасностью полета воздушного судна, на базе которого проводится определение сигнала парирования угрозы авиационного происшествия. В процессе анализа воздействующих на безопасность полета воздушного судна факторов выделены в отдельные группы психофизическое состояние экипажа, исправность бортового оборудования летательного аппарата и погодные условия полета. На основе выполненного анализа предложена целевая функция управления безопасностью полета воздушного судна в виде максимума оценки безопасности полета, который обеспечивается выходным сигналом системы управления безопасности полета судна. Определение сигнала управления осуществляется на базе графа состояния условий полета воздушного судна, который позволяет оценить причинно-следственную взаимосвязь факторов угрозы авиационного происшествия, а также определить сигнал управления безопасностью полета судна.

Полученные в процессе выполнения работы результаты могут быть использованы для программно-аппаратной реализации систем управления безопасностью полета воздушных судов, а также при проектировании систем и комплексов его бортового оборудования.

Ключевые слова: система управления безопасностью полета, авиационное происшествие, оптимальное управление, граф состояний, сигнал управления

Introduction

The active development of computer technology has significantly influenced the use and moderniza-

tion of onboard equipment of aircraft (AC), incl. control systems. Here it is necessary to note the complex control systems, which include the systems of remote and automatic control of the vessel, in

addition, the intelligent support of the crew using limiting signals [1, 2]. The use of intelligent crew support systems together with the limiting signal system is associated with rather stringent requirements for aircraft flight safety.

Ensuring the safety of aircraft flights [3] is a very urgent scientific and technical task, which is confirmed by statistics: the number of accidents in 2000–2016, about 200 units. Typically, the specified level of aircraft flight safety is ensured by compliance with the requirements for its operation (on the ground and in the air), redundancy, control and reconfiguration of critical systems of its equipment. However, 83 % of aviation accidents occur due to the human factor, 15 % — due to failures and malfunctions of aviation equipment, 2 % — due to external influencing factors [3]. Consequently, most of the accidents occur due to the human factor, as well as equipment failures. In this case, an accident can occur due to the influence of a single factor or their combination. For example, failure of the aircraft hydropower system (a single factor) can lead to a catastrophic situation. Further, the wrong actions of the aircraft crew in bad weather conditions can lead to an aircraft accident, and its presence is due to the influence of a combination of two or more factors.

Thus, the development of modern means of parrying the threat of an aviation accident should be made taking into account the combination of factors affecting the safety of the flight of the vessel. However, these means should have the functions of recognition, prediction of threat of the accident, warning her crew availability and advise the crew of how it can parry or output of the control signal in the mating system and the device avionics of the aircraft.

Currently, there are various ways and devices to warn the crew about the threat of an accident. For example, the method of supporting the aircraft operator in dangerous situations [3] allows an expert system to assess the performance of on-Board equipment and the actions of the crew, followed by predicting an emergency and notifying the crew of its presence. It is worth noting that the technical implementation of this method allows you to notify the crew of the threat of an aviation accident and does not issue a control signal to the means of parrying the threat.

Therefore, countering the threat of an accident should be carried out by means of aircraft flight safety control, the control signal of which will reduce the negative influence of external and internal influencing factors on the aircraft flight conditions.

Formulation of the problem

The purpose of this work is to develop a method for calculating the safety control signal of an aircraft flight, the implementation of which will minimize the threat of an aircraft accident and ensure a high level of safety of the aircraft flight.

To achieve the goal, you must complete the following steps:

- a) analyze the factors affecting the safety of the aircraft;
- b) define the safety objective of the ship's flight;
- c) develop a method for calculating the aircraft safety control signal;
- and d) simulate the flight safety control signal.

Description and analysis of factors affecting the safety of aircraft flight

Controlling an aircraft is a complex technical process that is influenced by various factors. These include internal influencing factors (condition of onboard equipment, load-bearing and load-bearing structural elements of the aircraft, crew). When assessing the threat of an accident, it is also necessary to take into account external influencing factors (terrain, weather conditions of the flight, other air traffic participants, etc.). Moreover, each type of influencing factors is divided into groups, the characteristics of which are presented in table.

It can be seen from the table that each group is characterized by a set of input variables that assess the state of the factors and their impact on the aircraft flight. These factors are poorly formalized, so the input variables must be represented as a linguistic variable. Moreover, each linguistic variable is set on a set of fuzzy values "*Fatigue*" that belong to a certain space-time region. For example, the linguistic variable "*Fatigue*" is defined by three sets $[-1 \div -0.5]$; $[-0.5 \div 0.5]$; $[0.5 \div 1]$. Moreover, the set $[-1 \div -0.5]$ — characterizes high crew fatigue; $[-0.5 \div 0.5]$ — average; $[0.5 \div 1]$ — high.

The fuzzy values of linguistic variables determined during registration are fed to the input of the flight safety control system (FSCS). This system is part of the aircraft onboard equipment complex. The actions of the aircraft security management system are related to the recognition of the threat of an aviation accident, with the subsequent assessment of its consequences, as well as with the prediction of the direction of its development and with informing the pilots about the threat using the means of sound

Characteristics of parameters that affect flight safety

№	Group	Parameter	Measurement method	Linguistic variables
1	Psycho-physical state of the pilot	Fatigue	By pupil response sensor, strain gauges	Low f_1 Middle f_2 High f_3
		Attention	Pupil reaction sensor	High k_1 Average k_2 Low k_3 Scattered k_4
		Preparation level	Pilot test tasks	High f_1 Average f_2 Low f_3
		Stress	Pupil reaction sensor	No k_1 Low k_2 Average k_3 High k_4
2	Aircraft condition	Failure of functionally significant elements	Means of signaling and failure indication	Insignificant f_1 Emergency f_2 Catastrophic f_3
		Deformation of load-bearing structure elements	Load measurement sensors	Absent k_1 Insignificant amount k_2 Essential k_3 Critical k_4
		Aircraft controllability and stability	Characteristic of the control object	High f_1 Average f_2 Low f_3
		Error in the aircraft control system software	Detecting failure of the aircraft control system function	No k_1 Insignificant amount k_2 Essential k_3 Critical k_4
3	Weather conditions	Headwind	Change of aircraft flight parameters	Weak f_1 Average f_2 Strong f_3
		Side wind	Change of aircraft flight parameters	Weak f_1 Average f_2 Strong f_3
		Visibility	Photocells	Good k_2 Bad k_1

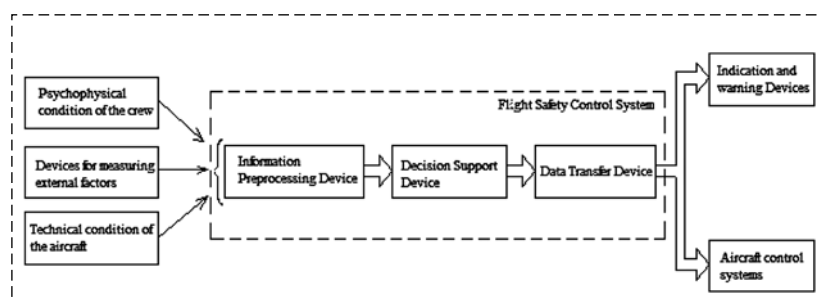


Fig. 1. Structural diagram of an aircraft FSCS flight

and light indication. The block diagram of the system (Fig. 1).

In accordance with the structural diagram, the core of the aircraft SMS is a device for supporting decision-making by the crew, which is connected with devices for preliminary processing and information transfer. On the basis of preliminary data processing, electrical signals are generated about the output of the values of the controlled variables from the specified intervals. This allows the threat of an accident to be detected and its consequences assessed. Then, based on the preliminary processing information, the decision support device generates data on the possible directions of the threat development, which it warns the crew about using the output device. At the same time, the decision support device also generates recommendations for the pilot to neutralize the threat of an accident.

Thus, the system based on two-level recognition of aircraft flight conditions and predicting the development of an accident reduces the likelihood of a false conclusion about its presence and consequences. It is expedient to implement the data preprocessing device on the basis of programmable logic integrated circuits using fuzzy logic algorithms.

Determination of the target safety function of the aircraft flight

According to the analysis of the safety of the aircraft flight, the assessment of the quality of its control is carried out on the basis of the flight conditions under the influence of external and internal factors. Then the input variables of the mathematical model for assessing the safety of aircraft flight will be the variables characterizing the psychophysical state of the crew, weather conditions of the ship's flight, the technical condition of the ship and its onboard equipment. In this case, the output variable of the model is the assessment of the safety conditions of the aircraft flight. Considering that the input and output variables

of the aircraft flight safety assessment model are complex non-deterministic and difficult to formalize, then the apparatus of fuzzy logic should be used as the mathematical apparatus of the model.

The general view of the mathematical model for assessing the flight conditions of an aircraft can be represented by the expression:

$$\forall t \in [t_s; t_f]: Y_i(t) \subseteq F_i[X_1(t), X_2(t), X_3(t), u(t), t] \quad (1)$$

where $X(t)$ are input variables of the flight safety assessment model, $Y_i(t)$ is the output variable of the model (aircraft flight safety assessment), $F_i[X_1(t), X_2(t), X_3(t), u(t), t]$ — objective flight safety management function

A necessary condition for the safety of an aircraft flight is a high psychophysical state of the crew, technical serviceability of the aircraft and its onboard equipment, good weather conditions, then the objective function will take the following form:

$$F_i[X_1(t), X_2(t), X_3(t), u(t), t] \rightarrow \max. \quad (2)$$

Initial conditions:

$$F_0[X_1(t), X_2(t), X_3(t), u(t), t] = Y_0. \quad (3)$$

Objective function constraints are as follows:

$$A \leq F_i[X_1(t), X_2(t), X_3(t), u(t), t] \leq B \quad (4)$$

where A, B are the maximum and minimum admissible values [0.5:1.0] of the objective function in the range [0.5: 1.0], which are determined from the possible conditions of the aircraft flight.

Thus, the optimal control of the aircraft flight safety must ensure that the condition for the maximum of the objective function (2) is satisfied under its given initial and boundary conditions.

Development of a method for calculating the aircraft flight safety control signal

In the process of aircraft control, the safety of its flight changes, the assessment of which $Y(t) \in [0; 1]$ is carried out depending on the values of internal and external influencing factors of flight safety ($X_1(t)$ is the psychophysical state of the crew, $X_2(t)$ is the technical the state of the control object, $X_3(t)$ is the weather conditions of the flight). At the same time, countering the threat of an aviation accident is carried out as follows:

1) the pilot by independent actions prevents the threat of an aviation accident, which is performed with the crew's decision support system disabled, voice translators, etc.

2) the pilot on the recommendations of decision support prevents the development of the threat of an aviation accident, which occurs under the condition of a positive psychophysical state of the crew and a working safety management system, a voice translator and other means of issuing recommendations to the crew;

3) aircraft control systems fend off the threat of an aircraft accident without the participation of the crew with its low psychophysical state, minor failures of onboard equipment.

Assessment of the quality of parrying the threat of an accident is carried out as follows:

1) crew actions are sufficient to parry an accident and $Y(t) \rightarrow 1.0$;

2) the actions of the crew are not enough to parry an accident and $Y(t) < 0,8$;

3) the actions of the aircraft control systems are sufficient to parry an accident and $Y(t) \rightarrow 1.0$;

4) the actions of the aircraft control systems are not enough to parry an aircraft accident and $Y(t) < 0,8$;

5) correct issuance of recommendations to the crew on countering the threat of an aviation accident and, as a result, the actions of the crew correspond to clause 1 of this list;

6) incorrect issuance of recommendations to the crew on countering the threat of an accident and, as a result, the actions of the crew correspond to clause 2 of this list.

At the same time, each action to counter the threat of an aviation accident can lead to an improvement, deterioration and absence of changes in the safety of the aircraft flight. Then the aircraft flight safety control signal can take the following values:

1) $u(t) = [-1:0]$ — deterioration of aircraft flight safety;

2) $u(t) = 0$ — no changes in aircraft flight safety from the control action;

3) $u(t) = (0:1]$ — improvement of aircraft flight safety.

Considering that the problem of optimal control of aircraft flight safety is solved within the framework of the creation of a safety control system for the flight of an aircraft, then we will accept two methods of countering the threat of an aircraft accident:

a) the threat is countered by the action of the crew on the recommendation of the decision support device — $z_1(t)$;

b) the threat is countered by automatic control systems — $z_1(t)$ at $X_1(t) \rightarrow \max$.

Thus, the general view of aircraft flight safety management can be represented by the ratio:

$$u(t) = \begin{cases} f(z_1(t)), & \text{at } k = 0; \\ f(z_2(t)), & \text{at } k = 1, \end{cases} \quad (5)$$

where $k = \langle X_1(t), X_2(t) \rangle$ — conditions for turning on the automatic parrying of the threat of an accident based on the psychophysical state of the crew and the state of the onboard equipment.

Let $z_i(t) \in G$, where $G \subseteq (g_1, g_2)$, then using expression (5) and a mathematical model for assessing the safety of an aircraft flight (1):

$$z_i(t) = f(g_{1i}, g_{2i}) = \langle Y(t); X_1(t); X_2(t); X_3(t), k(t) \rangle, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

where G is the set of control actions to counter the threat of an aviation accident; g_1, g_2 — subsets of manual and automatic control to counter the threat of an accident, respectively; g_{1i}, g_{2i} — elements of a subset of manual and automatic control in countering the threat of an aircraft accident.

Thus, the solution to the optimal control problem for aircraft flight safety consists in finding the variable $z_i(t) \in G$ in accordance with expression (2) and ensuring that the condition $Y(t) \rightarrow \max$ is satisfied. The problem can be solved under the following initial and boundary conditions:

$$u(0) = z_0 = 0; \quad 0 < u(t) < 1. \quad (7)$$

The calculation of the aircraft flight safety control signal can be carried out on the basis of the graph of the state of the aircraft flight conditions, which is described by the Kolmogorov — Chapman equations. The graph of the state of the aircraft flight conditions (Fig. 2), where 0 — no emergency conditions for the aircraft flight, 1 — difficult flight conditions with deterioration of the aircraft onboard equipment and weather conditions of the

flight; 2 — difficult flight conditions with deterioration of the psychophysical state of the crew and weather conditions of the flight; 3 — emergency flight conditions with deterioration of the aircraft onboard equipment and weather conditions of the flight; 4 — emergency flight conditions with deterioration of the psychophysical state of the crew and weather conditions of the flight; 5 — catastrophic flight conditions; $z_{11}(t)$ — countering the threat of an accident by the actions of the crew in difficult conditions of aircraft flight; $z_{13}(t)$ — countering the threat of an accident by actions of the crew in emergency conditions of aircraft flight; $z_{15}(t)$ — countering the threat of an aircraft accident by the actions of the crew in the event of a threat of disaster $z_{22}(t)$ — countering the threat of the aviation automatic control system of the aircraft in difficult conditions of aircraft flight; $z_{24}(t)$ — countering the threat of the aviation automatic control system of the aircraft in emergency conditions of aircraft flight; c_{11} — indicator of transition of aircraft flight conditions from state 0 to state 1; c_{13} — indicator of transition of aircraft flight conditions from states 0 and 1 to state 3; c_{15} — indicator of transition of aircraft flight conditions from states 1 and 3 to state 5; c_{22} — indicator of transition of aircraft flight conditions from state 0 to state 2; c_{24} — indicator of transition of aircraft flight conditions from states 0 and 2 to state 4; c_{25} — indicator of transition of aircraft flight conditions from states 2 and 4 to state 5; c_{23} — indicator of transition of aircraft flight conditions from state 2 to state 3; c_{14} — indicator of transition of aircraft flight conditions from state 1 to state 4; c_{35} — indicator of transition of aircraft flight conditions from state 0 to state 5.

The figure shows that the state of the aircraft flight conditions are interconnected by the direct transition of one state to another, as well as by the transition through an intermediate state. For example, an emergency flight condition for an aircraft (3) can arise from without an emergency flight condition (0) and as a result of a worsening of difficult flight conditions (1 and 2). In this case, the signal to counter the threat of an accident must ensure the transition of the current flight condition to the non-emergency mode of the aircraft flight, which will ensure the specified speed of the aircraft flight safety control system.

Using the Kolmogorov — Chapman equations and the graph of the aircraft flight safety state, it is possible to compose a system of equations for the rate of change of the flight safety assessment in its various states (the system of flight safety control system):

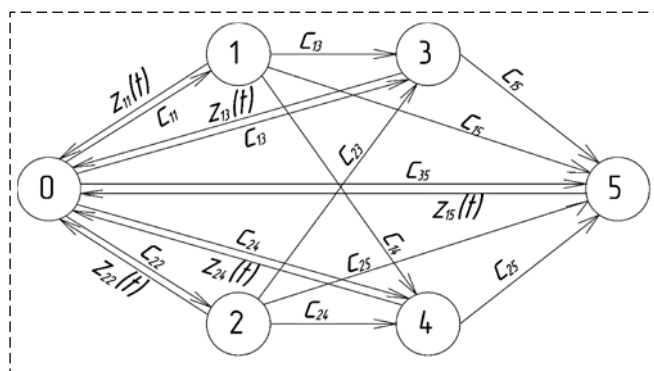


Fig 2. Aircraft flight safety graph

$$\begin{aligned}
\frac{dY_0(t)}{dt} &= z_{11}(t)Y_1(t) + z_{13}(t)Y_3(t) + \\
&+ z_{15}(t)Y_5(t) + z_{24}(t)Y_4(t) + z_{22}(t)Y_2(t) - \\
&- (c_{11} + c_{22} + c_{35} + c_{13} + c_{24})Y_0(t); \\
\frac{dY_1(t)}{dt} &= c_{11}Y_0(t) - \\
&- (c_{13} + c_{14} + c_{15})Y_1(t) - z_{11}(t)Y_1(t); \\
\frac{dY_2(t)}{dt} &= c_{22}Y_0(t) - \\
&- (c_{23} + c_{24} + c_{25})Y_2(t) - z_{22}(t)Y_2(t); \\
\frac{dY_3(t)}{dt} &= c_{13}(Y_1(t) + Y_0(t)) - z_{13}(t)Y_3(t); \\
\frac{dY_4(t)}{dt} &= c_{24}(Y_2(t) + Y_0(t)) - z_{24}(t)Y_4(t); \\
\frac{dY_5(t)}{dt} &= c_{15}(Y_3(t) + Y_1(t)) + \\
&+ c_{25}(Y_4(t) + Y_2(t)) + c_{35}Y_0(t) - z_{15}(t)Y_5(t),
\end{aligned} \tag{8}$$

where $Y_0(t)$, $Y_1(t)$, $Y_2(t)$, $Y_3(t)$, $Y_4(t)$, $Y_5(t)$ is the assessment of the aircraft flight safety in normal, difficult, emergency and catastrophic flight conditions.

Thus, the calculation of the aircraft flight safety control signal consists in solving the system of equations (8) for the current aircraft flight condition for the given initial and boundary conditions of the control signal (7), the known aircraft flight condition state, as well as indicators of the transition between aircraft flight conditions.

Simulation of the aircraft flight safety control signal

In the process of performing the work, the simulation of the aircraft flight safety management system was carried out in terms of assessing the threat of an aviation accident and calculating the safety control signal of its flight. In the first case, the aircraft flight conditions are assessed based on information characterizing the state of external and internal factors that affect the safety of the ship's flight and, based on fuzzy logic methods, a conclusion is drawn about the threat of an accident. Then, according to the data of the threat of an accident, the signal of the aircraft flight safety control is calculated, the action of which is aimed at countering the threat of an accident.

In fig. 3 (see the fourth side of the cover) shows the results of modeling the threat of an aviation accident.

In the process of modeling the threat of an aviation accident, the following flight conditions were obtained:

— with linguistic variables equal to "1", the value of flight conditions is "0.8", which corresponds to an accident-free flight regime, therefore, there is no threat of an accident (Fig. 3a);

— with linguistic input variables equal to mean values, the flight conditions will correspond to a complex state, i.e. under the influence of a combination of influencing factors, aircraft control is created and becomes much more complicated (Fig. 3b).

Suppose that during the time $T = [t_H; t_K]$, the flight safety conditions changed from state 0 to state 1 without transition to other aircraft flight safety states, then the system of flight safety equations (8) will take the following form:

$$\begin{aligned}
\frac{dY_0(t)}{dt} &= z_{11}(t)Y_1(t) - c_{11}Y_0(t); \\
\frac{dY_1(t)}{dt} &= c_{11}Y_0(t) - z_{11}(t)Y_1(t).
\end{aligned} \tag{9}$$

To solve the system of equations (9), it is necessary to introduce the total characteristic of the flight safety assessment (K) for accident-free and difficult flight conditions, which can be represented by the expression:

$$Y_1(t) + Y_0(t) = K. \tag{10}$$

The solution of the system of equations (9) taking into account (10) with respect to $Y_0(t)$ takes the following form:

$$\frac{dY_0(t)}{dt} = z_{11}(t)(K - Y_0(t)) - c_{11}Y_0(t); \tag{11}$$

$$\frac{dY_0(t)}{dt} = Kz_{11}(t) - (c_{11} + z_{11}(t))Y_0(t); \tag{12}$$

$$\frac{dY_0(t)}{dt} + (c_{11} + z_{11}(t))Y_0(t) = Kz_{11}(t). \tag{13}$$

A particular solution to equation (13):

$$Y_0(t) = \frac{Kz_{11}(t)}{c_{11} + z_{11}(t)}. \tag{14}$$

General solution of equation (13):

$$Y_0(t) = Ce^{-(c_{11} + z_{11}(t))t}. \tag{15}$$

Using expressions (14) and (15), the solution to equation (13) can be written in the form:

$$Y_0(t) = Ce^{-(c_{11} + z_{11}(t))t} + \frac{Kz_{11}(t)}{c_{11} + z_{11}(t)}; \tag{16}$$

$$C = -\frac{Kz_{11}(t)}{c_{11} + z_{11}(t)}. \tag{17}$$

Thus, the transition of aircraft flight safety from state 1 to state 0 has the following form:

$$Y_0(t) = \frac{Kz_{11}(t)}{c_{11} + z_{11}(t)} [1 - e^{-(c_{11} + z_{11}(t))t}] \quad (18)$$

where $c_{11} = Y_1(t)/Y_0(t)$.

Using the Taylor series expansion $e^{-(c_{11} + z_{11}(t))t}$ we get:

$$Y_0(t) = \frac{Kz_{11}(t)}{c_{11} + z_{11}(t)} [z_{11}(t) + c_{11}]t. \quad (19)$$

Let us express the variable $z_{11}(t)$ from expression (18):

$$z_{11}(t) = \left| \frac{a(t)c_{11}}{K - a(t)} \right| \quad (20)$$

where $a(t) = Y_0(t)/t$.

Based on expression (20), it is possible to determine changes in the safety control signal of an aircraft flight with a deterioration in the psychophysical parameters of the crew and external influencing factors. It is known from work [1] that $Y_0(t) = 1$ and $Y_1(t) = 0,5$. Then $K = 1,5$, $c_{11} = 0,5$. Suppose that $T = [0:0,5]$ h.

Substituting the known values into expression (20), we get:

Fig. 4 that the change in the aircraft safety control signal under difficult control conditions is $z_{11}(t) = [0:2]$ and has a continuously increasing character. It should be noted that the control signal counteracts the threat of accident for 0.325 h, then the action of the signal is aimed at maintaining a trouble-free flight condition. Further processing of the signal consists in its normalization in accordance with the level of control signals of the aircraft onboard systems. The

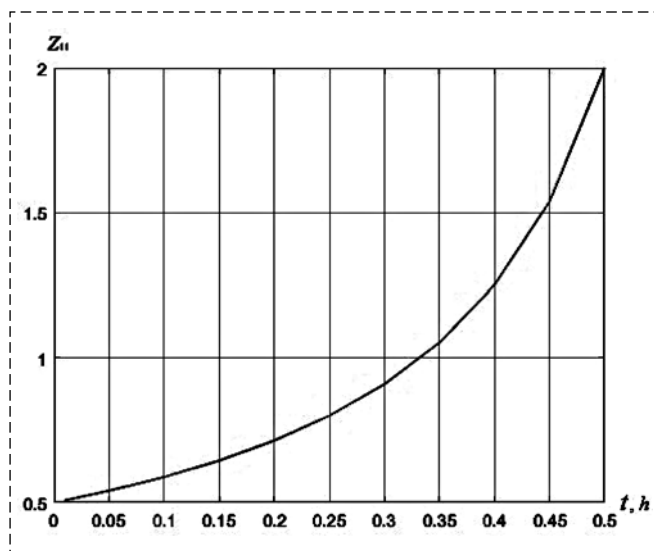


Fig. 4. Change of flight safety control signal

results obtained can be used in the development of software for the flight safety control system.

Conclusion

As a result of the work, the analysis of external and internal influencing factors influencing the safety of the aircraft flight was carried out, on the basis of which the target safety function of the aircraft flight was determined. In this case, the optimal control of flight safety consists in ensuring the maximum of the objective function for its given initial and boundary conditions. To solve this problem, a method is proposed for calculating the safety control signal of an aircraft flight, the action of which is aimed at ensuring a high level of aircraft flight safety and minimizing the threat of an aircraft accident. The calculation of the aircraft flight safety control signal is based on the graph of the state of aircraft flight conditions and its mathematical model based on the Kolmogorov — Chapman equations.

The proposed method for calculating the aircraft flight safety control signal is advisable to use in the algorithms and software of the aircraft SMS.

Reference

1. Sapagov V. A., Anisimov K. S., Novozhilov A. V. Fail-safe Computing System for Integrated Flight Control Systems, *Trudy MAI*, vol. 45, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/> (Accessed: 01.03.2017) (in Russian).
2. Obolensky Ju. G. et al. Remote control systems and steering gears: structures and developments, *Vestnik MAI*, 2016, vol. 20 (2), pp. 161—171 (in Russian).
3. Black G. Th., Moorhouse D. J. Flying Qualities Design Requirements for Sidestick Controllers, 1979, 186 p., available at: <http://contrails.iit.edu/reports/9304>.
4. Popov Ju. V. Safety indicators of aviation flights, Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-6/10-06-14.ttb.pdf> (Accessed: 04.02.2017) (in Russian).
5. Zheltov S. Yu., Fedunov B. E. Operational Goal-Setting in Anthropocentric objects from the Viewpoint of the Conceptual Model called Etap: I. Structures of Algorithms for the Support of Crew Decision-Making, *J. Comput. Syst. Sci.*, 2015, vol. 54, no. 3, pp. 384—398.
6. Levin D. N., Grif M. G. Formalization of Ergonomic Indicators During Research Data-Control Field of the Aircraft Cockpi, *2019 Modern Safety Technologies in Transportation (MO-SATT)*, Kosice, Slovakia, 2019, pp. 94—97.
7. Fedunov B. E., Prokhorov M. D. Conclusion on precedent in knowledge bases of onboard intellectual systems, *Iskusstvennyy intellekt i prinjatie reshenij*, 2010, no.3, pp. 63—72 (in Russian).
8. Bolshakov A. A., Kulik A. A., Sergushov I. V. (2016). Development the control system algorithms functioning of flight safety for the aircraft of helicopter type, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 358—362 (in Russian).
9. Kuklev E. A. Safety management of aircrafts based on fuzzy assessments of risks of abnormal flight conditions, *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2016, no. 226, pp. 199—205 (in Russian).
10. Rezhnikov A. F. et al. Diagnostics of operators' dangerous states in case of critical events' combinations in man-machine systems, *Vestnik komp'yuternyyh i informacionnyh tekhnologij*, 2017, no. 8(158), pp. 48—56 (in Russian).



31 мая – 21 июня 2020 г.



в Санкт-Петербурге
на базе ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
состоятся конференции:

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

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5510, (499) 269-5397**

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

Сдано в набор 25.08.2020. Подписано в печать 19.10.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1120. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

16-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА

MetrolExpo'2020

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ – ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

1–3 декабря
Москва, ВДНХ, пав. 55



Новый гибридный формат выставки
офлайн + онлайн



Стирает границы

неограниченное
количество участников
со всего мира



Увеличивает охват

использование искусственного
интеллекта для формирования
рекомендаций и нетворкинга



Упрощает коммуникации

благодаря современным
IT-технологиям



Платформа представлена в связке классических веб-страниц и приложения для iOS и Android.

ОРГАНИЗАТОР:

Выставочная компания «ВЭСТСТРОЙ ЭКСПО»

Телефон/Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)

E-mail: metrol@expoprom.ru



www.metrol.expoprom.ru