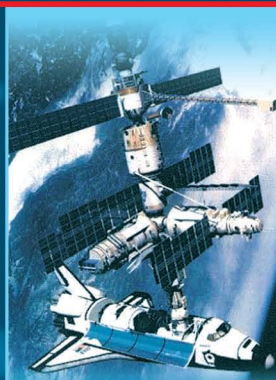


МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 24
2023
№ 9

Рисунки к статье В. А. Кушникова, А. С. Богомолова, В. А. Ивашенко,
А. Д. Селютина, А. Ф. Резчикова, Е. В. Кушниковой, А. И. Маркова
«ЗАДАЧА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ
АВИАРЕМОНТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ»



Рис. 1. Повреждения вертолета МИ-8, полученные в процессе его эксплуатации
Fig. 1. Damage to the MI-8 helicopter during exploitation

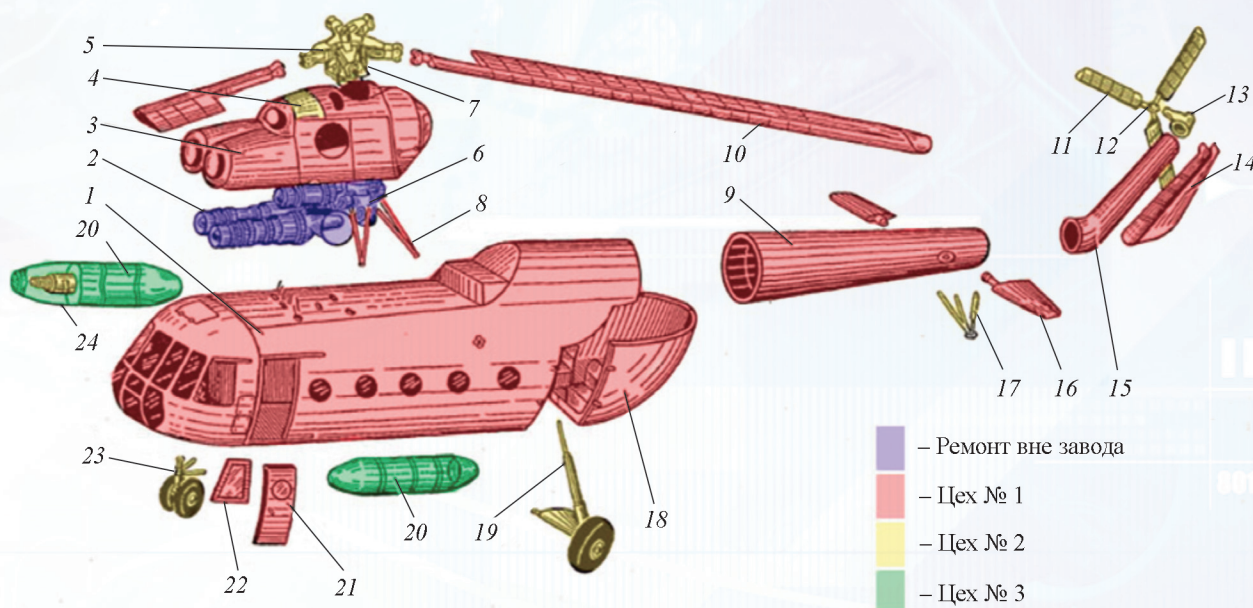


Рис. 3. Основные элементы конструкции вертолетов МИ-8 и их модификаций
Fig. 3. The elements of the MI-8 helicopter

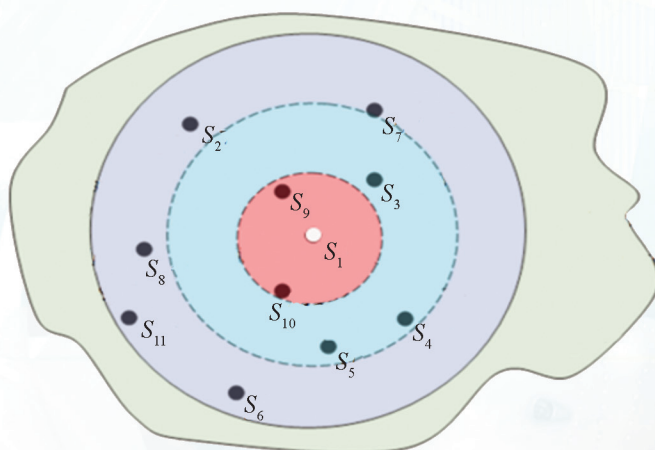


Рис. 5. Результаты упорядочивания ситуаций по степени близости к возникшей ситуации S_1

Fig. 5. Results of identifying production situations according to the degree of proximity to the production situation S_1 that has arisen

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 24

2023

№ 9

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:

БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.

ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.

ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:

АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН

БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН

ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН

ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН

КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН

КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН

КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН

ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН

РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН

СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН

СИГОВ А. С., акад. РАН

СОЙФЕР В. А., акад. РАН

СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН

ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН

ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН

ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН

ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН

ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:

DORANTES D. J., PhD, Турция

GROUMPOS P. P., PhD, Греция

ISIDORI A., PhD, Италия

KATALINIC B., PhD, Австрия

LIN CH.-Y., PhD, Тайвань

MASON O. J., PhD, Ирландия

ORTEGA R. S., PhD, Франция

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США

STRZELECKI R. M., PhD, Польша

SUBUDHI B. D., PhD, Индия

АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан

ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина

БОБЦОВ А. А., д.т.н.

БУКОВ В. Н., д.т.н.

ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.

ЖУКОВ И. А., д.т.н.

ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.

КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.

ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.

ЛОХИН В. М., д.т.н.

МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.

ПУТОВ В. В., д.т.н.

ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.

РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.

СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.

ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.

ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.

ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:

АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

- Кушников В. А., Богомолов А. С., Иващенко В. А., Селютин А. Д., Резчиков А. Ф.,
Кушникова Е. В., Марков А. И. Задача идентификации производственных ситу-
аций в системах управления производственными процессами авиаремонтного
предприятия 451

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Dembitsky N. L. Built-in Analog Automatic Controls for Small Robots 462

- Ахмад А., Ющенко А. С. Метод управления подводным роботом с волнообразным дви-
жителем с использованием активного подавления помех и нечеткой логики 469

- Крестовников К. Д. Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной систе-
мой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных
роботов 481

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Кожевников Ю. В., Шибанов Г. П. Оптимальное осреднение высотно-скоростных ха-
рактеристик летательных аппаратов при их летных испытаниях 489

- Агаев Н. Б., Оруджов Г. Г., Калбиев Н. Н. Планирование оптимальной опорной траек-
тории полета летательного аппарата с использованием карты рельефа местности 496

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

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 24

2023

No. 9

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

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

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

MAGOMEDOV M. Kh.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEYEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

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

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Kushnikov V. A., Bogomolov A. S., Ivashenko V. A., Selyutin A. D., Rezchikov A. F., Kushnikova E. V., Markov A. I. The Problem of Production Situations Identification in the Systems of Production Processes Management of an Aircraft Repair Enterprise 451

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Dembitsky N. L. Built-in Analog Automatic Controls for Small Robots 462

- Ahmad A., Yuschenko A. S. Undulating Propulsion Underwater Robot Control Method Based on ADRC and Fuzzy Logic 469

- Krestovnikov K. D. Control Algorithms for a Bidirectional Wireless Power Transmission System at the Redistribution of Energy Resources in a Group of Ground Robots 481

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Kojevnikov U. V., Shibanov G. P. Optimum Average of High-Speed to Describe of Aircraft by the Flying-Tests 189

- Agayev N. B., Orujov Q. H., Kalbiyev N. N. Planning the Optimal Reference Flight Path of an Aircraft Using a Terrain Map 496

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

В. А. Кушников, д-р техн. наук, проф., kushnikoff@yandex.ru,
А. С. Богомолов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., alexbogomolov@yandex.ru,
В. А. Иващенко, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ivaipmtu@yandex.ru,
А. Д. Селютин, аспирант, aseliutin@ya99.ru,
Федеральный исследовательский центр
"Саратовский научный центр Российской академии наук", г. Саратов,
А. Ф. Резчиков, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gw4cy@mail.ru,
Институт проблем управления Российской академии наук, г. Москва,
Е. В. Кушникова, канд. техн. наук, проф., доц., lkushnikova@yandex.ru,
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., г. Саратов,
А. И. Марков, аспирант, 8markov8@gmail.com,
Саратовский государственный университет им. Чернышевского Н. Г., г. Саратов

Задача идентификации производственных ситуаций в системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия

Описывается новый подход к решению проблемы идентификации аварийных ситуаций в процессах авиаремонтных работ путем формирования метрического пространства аварийных ситуаций и определения расстояния между его точками. Описаны основные этапы ремонта вертолетов Ми-8 и их модификаций на типовом авиаремонтном предприятии. Определены основные этапы решения задачи идентификации производственных ситуаций. На основе аппарата системной динамики сформирована математическая модель для классификации характеристик производственных ситуаций, возникающих в процессе ремонта вертолетов Ми-8. Список производственных ситуаций, контролируемых средствами вычислительной техники, составляется ведущими специалистами и включает все ситуации, влияющие на процесс выполнения производственной программы. При анализе производственной ситуации она сравнивается с известными ситуациями, занесенными в базу данных. Если в метрическом пространстве производственных ситуаций обнаруживается ее полное совпадение с известными ситуациями, то ситуация считается известной, ЛПР выдается перечень документов, необходимых для принятия адекватных управленческих решений. В противном случае в метрическом пространстве ситуаций определяется точка, наиболее близкая к возникшей ситуации, и управленческому персоналу выдаются документы, данные и рекомендации, непосредственно связанные с ситуацией, которую эта точка характеризует. Указанный процесс продолжается до тех пор, пока ЛПР не сочтет полученную информацию достаточной и не примет решения, адекватные возникшей ситуации. После окончания производственной ситуации уточненная информация по данным, документам и рекомендациям, использованном управленческим персоналом в процессе принятия решения, заносится экспертами в память ЭВМ, а сама ситуация включается в базу данных, используемую системой управления. Разработан информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов. Разработан программный комплекс в составе систем управления производственными процессами авиационного ремонтного предприятия. Определены показатели эффективности внедрения системы идентификации сложных производственных ситуаций на предприятии.

Ключевые слова: авиаремонтное предприятие, управление, безопасность, идентификация, фюзеляж, метрическое пространство, классификация производственных ситуаций, степень схождения

Введение

В настоящее время в процессе эксплуатации авиапарка страны часто возникает потребность ремонта вертолетов, получивших различные повреждения (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Как правило, такие работы выполняются на авиаремонтных предприятиях.

Для повышения оперативности и качества проведения работ на авиаремонтных предпри-

ятиях нередко используются различные виды систем управления производственными процессами. Некоторые из этих систем основаны на анализе прецедентных ситуаций (Case-Based Reasoning Systems) [9].

Теоретическое обоснование принципов функционирования таких систем было осуществлено в работах таких зарубежных и отечественных ученых, как Э. Фейгенбаум, Д. Уотермен, И. В. Прангишвили, Д. А. Пospelov, Г. С. По-

спелов, О. И. Ларичев, Ю. И. Клыков, Э. В. Попов, А. Ф. Резчиков и других [1–8]. В результате практического применения этой теории в настоящее время созданы и хорошо зарекомендовали себя на практике эффективные аппаратные и программные средства управления сложными производственными процессами.

Между тем, как показывает опыт объединения существующих систем автоматизации в единый информационный комплекс, для более успешного создания компьютеризированного интегрированного производства необходимо разработать новые задачи, модели, методы, алгоритмы и программные продукты, позволяющие значительно расширить функциональные возможности системы управления производственными процессами, повысить качество принимаемых решений и получить существенный экономический эффект. При этом основное внимание следует уделить задачам совершенствования математического обеспечения систем управления промышленным предприятием в сложных производственных ситуациях.

Использование прецедентного подхода при управлении сложными производственными

процессами позволяет существенно упростить используемое математическое обеспечение и уменьшить время поиска решений.

Приведенные выше соображения обуславливают актуальность, экономическую целесообразность и практическую значимость темы данной статьи, посвященной совершенствованию математического обеспечения системы управления авиаремонтного предприятия путем разработки новых моделей и методов идентификации производственных ситуаций в существующих системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия.

Структурная схема системы автоматизированного управления производственными процессами авиаремонтного предприятия приведена на рис. 2.

Особенности процесса идентификации производственных ситуаций, возникающих в процессе ремонта вертолетов МИ-8

Вертолет Ми-8 является самым распространенным вертолетом в мире. По данным на

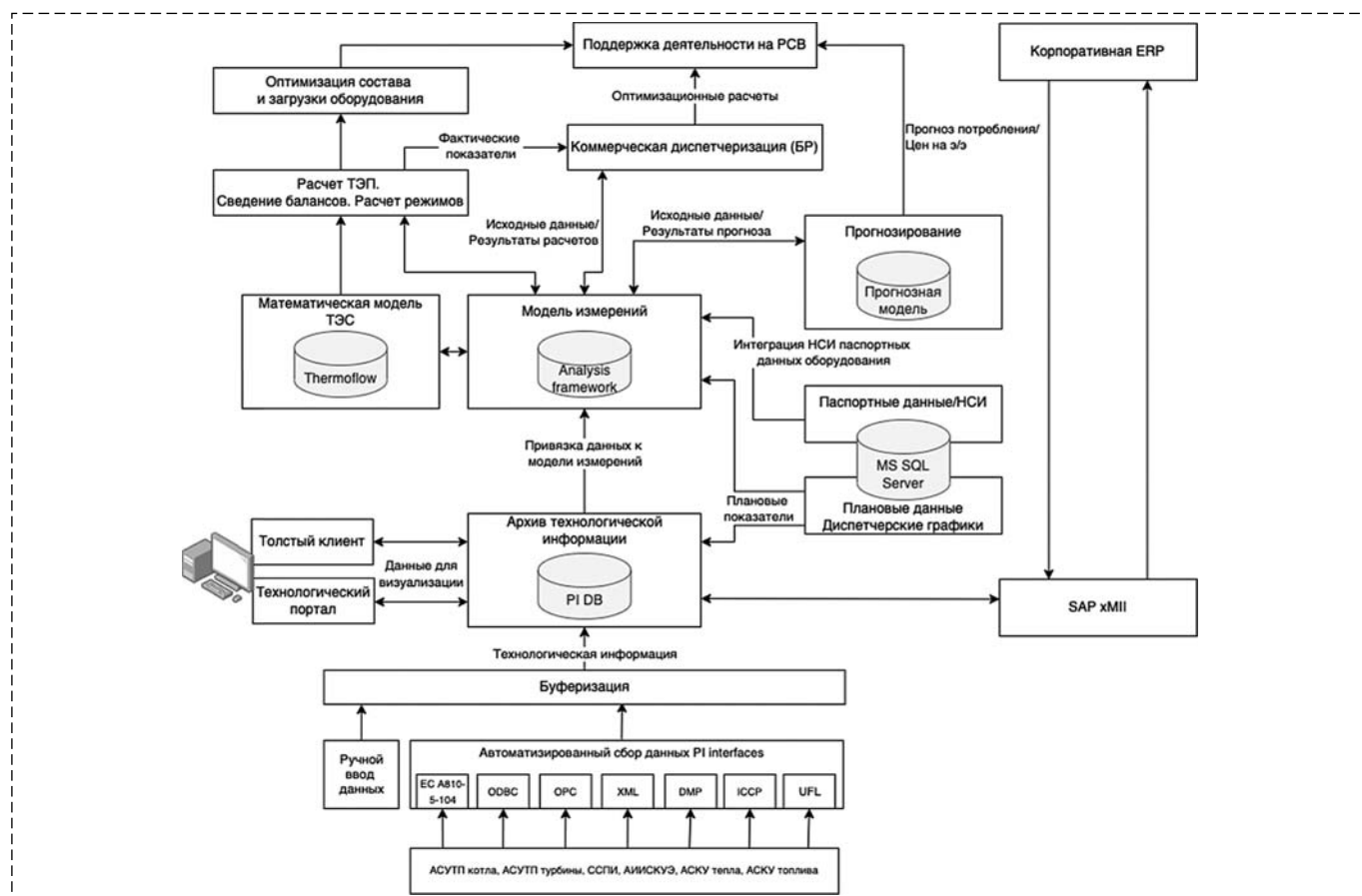


Рис. 2. Структура системы автоматизированного управления производственными процессами авиаремонтного предприятия [4]
Fig. 2. Structure of the automated process control system of an aircraft repair enterprise [4]

2011 г. произведено более чем 12 000 экземпляров данного воздушного судна.

При изготовлении вертолету назначается срок эксплуатации в годах и ресурс в часах налета, после которых вертолет обязан пройти капитальный ремонт на авиационном ремонтном предприятии. Производственный процесс капитального ремонта вертолета — это сложная система, взаимодействующая с внешними целеполагающими системами. Основные элементы конструкции вертолета МИ-8, определяющие структуру производственного процесса авиаремонтного предприятия, изображены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) [10, 11].

Здесь 1 — носовая и средняя части фюзеляжа; 2 — двигатели; 3 — капоты; 4 — вентилятор; 5 — втулка несущего винта; 6 — главный редуктор; 7 — автомат перекаса; 8 — редукторная рама; 9 — хвостовая балка; 10 — лопасти несущего винта; 11 — лопасти хвостового винта; 12 — втулка хвостового винта; 13 — хвостовой редуктор; 14 — обтекатель концевой балки; 15 — концевая балка; 16 — стабилизатор; 17 — хвостовая опора; 18 — створки грузового люка; 19 — главные ноги шасси; 20 — подвесные топливные баки; 21 — входные дверь; 22 — сдвижной блистер; 23 — передняя нога шасси; 24 — установка обогревателя КО-50.

Процесс ремонта происходит следующим образом. Заказчик после заключения договора на ремонт предает вертолет авиационному ремонтному заводу (АРЗ). На территории заво-

да приемку осуществляют работники АРЗ на станции летных испытаний (СЛИ) в присутствии представителей заказчика.

Рассмотрим принципиальную схему организации ремонта вертолетов типа Ми-8 и его модификаций на типовом авиаремонтном предприятии, которая представлена на рис. 4.

Здесь РЦ — разборочный цех; П — промывка; Д — определение дефектов; Рм — ремонт, К — комплектация; С — сборка; И — испытания; ОТК — отдел технического контроля; СЛИ — станция летных испытаний.

Во время приемки тщательно проверяется документация, приложенная к вертолету. Основными документами являются формуляры и паспорта на вертолет, силовую установку, авиационное и радиоэлектронное оборудование, а также паспорта на агрегаты вертолета. После проверки соответствия фактических параметров параметрам, указанным в документации, проводится визуальный осмотр. По его результатам все установленные дефекты заносятся в дело ремонта.

Пройдя приемку, вертолет проходит предварительную дефектацию (в том числе проверку геометрии — нивелировку) и поступает в цех № 1. В данном цехе проводится разборка вертолета. Снятые агрегаты распределяются по соответствующим цехам ремонта (№ 1—6). Ремонт агрегатов в цехах, в свою очередь, разбит на семь этапов: разборку, промывку, дефектацию, ремонт, комплектацию, сборку, испытания.

После прохождения этих этапов агрегаты из всех цехов поступают в цех № 1, где проводится дальнейшая сборка, монтаж и покраска. После выполнения всех указанных операций в цехе № 1 выполняются контрольный осмотр вертолета и испытания его агрегатов. Далее вертолет поступает на СЛИ, где проводятся наземные контрольные испытания, заправка вертолета всеми видами ГСМ, его доводка. Затем осуществляются летные испытания. Заказчиками вертолет принимается на СЛИ.

Таким образом, на типовом авиаремонтном предприятии, как правило, проводятся следующие виды работ, определяющие

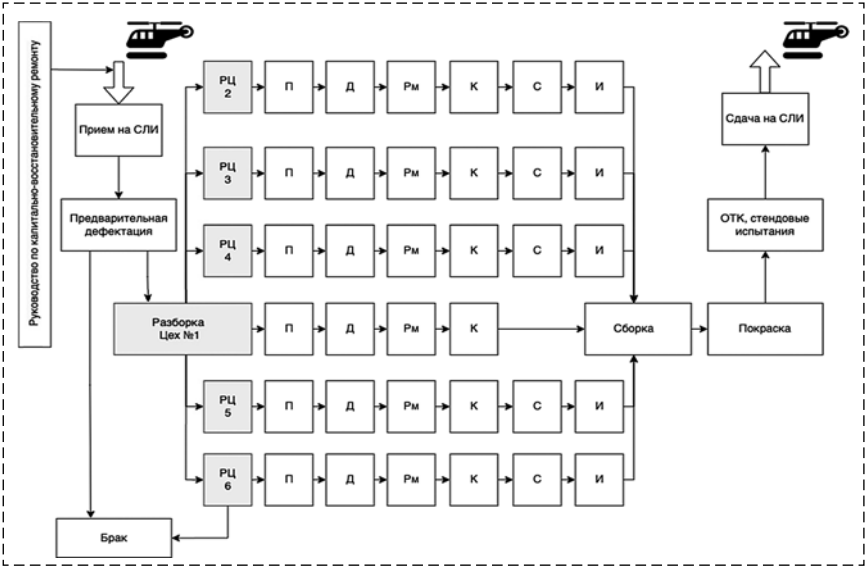


Рис. 4. Основные этапы ремонта вертолетов Ми-8 и их модификаций на типовом авиаремонтном предприятии

Fig. 4. The main stages of Mi-8 helicopters repair at an aircraft repair enterprise

состав и структуру соответствующих производственных процессов:

- ремонтно-восстановительные работы;
- капитальный ремонт вертолетов и их компонентов;
- доработка вертолетов по требованиям заказчика;
- выполнение модификаций вертолета по согласованной документации.

Кроме того, на данном предприятии часто изготавливаются изделия, необходимые для ремонта авиационной техники: элементы остекления вертолета, шланги, трубопроводы, тросы, антенны, жгуты и др.

Постановка задачи

Допустим, что в процессе функционирования авиаремонтного предприятия периодически возникают сложные производственные ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$, требующие принятия решения на основе анализа документов и данных, хранящихся в распределенной базе данных, включающей информацию о множестве различных производственных ситуаций, возникающих на авиаремонтном предприятии. Здесь $a(t)$, $u(t)$ — векторы параметров окружающей среды и управляющих воздействий, характеризующих производственную ситуацию, соответственно. Будем считать, что каждая сложная производственная ситуация $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$ однозначно характеризуется множеством характеристик

$$\{Name, Reason, Consequence, Time, Division, Action, A_1, A_2, ..., A_n, Documents, Data\}, \quad (1)$$

где *Name*, *Reason*, *Consequence*, *Time* — наименование, причина, последствия, время начала и окончания производственной ситуации; *Division* — подразделения предприятия, затронутые данной ситуацией; *Action* — мероприятия, необходимые для разрешения ситуации; $A_1, A_2, ..., A_n$ — параметры объекта управления, системы управления и окружающей среды, учитываемые ЛПР при принятии решения в сложившейся ситуации; *Data*, *Documents* — перечень данных и документов, используемых ЛПР при принятии решения.

Примем также, что на предприятии существует информационное хранилище, в котором размещено множество документов $\{D\}$ и

множество данных $\{F\}$, используемых ЛПР при управлении производственным процессом в ситуациях $\{S(a(t), u(t))\}$.

С учетом сделанных допущений формализованная постановка решаемой задачи имеет следующую формулировку.

Для систем управления авиаремонтного предприятия разработать методы и алгоритмы идентификации производственных ситуаций, позволяющие на временном интервале t_h, t_k при известных параметрах среды $a(t) \in \{A(t)\}$ и управляющих воздействиях $u(t) \in \{U(t)\}$, характеризующих сложную производственную ситуацию, в течение времени, отведенного на решение задачи, выполнить следующие действия:

1) установить степень совпадения возникшей сложной производственной ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$ с другими из множества $\{S(a(t), u(t))\}$;

2) упорядочить все ситуации множества $\{S(a(t), u(t))\}$ по степени их близости к возникшей ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$ в метрическом пространстве производственных ситуаций;

3) определить данные и документы, которые в возникшей ситуации должен учесть ЛПР в процессе выработки решения: $d_1, d_2, ..., d_w \in \{D\}$, $f_1, f_2, ..., f_v \in \{F\}$, $w \ll |\{D\}|$, $v \ll |\{F\}|$ и упорядочить их по степени важности представляемой информации:

$$\begin{aligned} R(d_z) &> R(d_x) > R(d_c) > ..., > R(d_t), \\ z, x, c, t &\leq w; \\ R(f_{z_1}) &> R(f_{x_1}) > R(f_{c_1}) > ..., > R(f_{t_1}), \\ z_1, x_1, c_1, t_1 &\leq v, \end{aligned}$$

где $\ll$ — значительно меньше, $d_1, d_2, ..., d_w$ — данные, необходимые ЛПР для принятия решения в ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$; $f_1, f_2, ..., f_v$ — документы, необходимые ЛПР для принятия решения в ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$; $R(d_z)$ — ранг документа d_z , характеризующий степень важности документа для процесса выработки решения в возникшей производственной ситуации; $R(f_{z_1})$ — ранг данного f_{z_1} ; w, v — число данных и документов, характеризующих сложную производственную ситуацию $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$; $\{U(t)\}$, $\{A(t)\}$ — множество допустимых значений вектора управляющих воздействий и вектора параметров окружающей среды, соответственно; $|\{D\}|$, $|\{F\}|$ — мощности множеств $\{D\}$ и $\{F\}$, соответственно.

Разработка метрики для сравнения производственных ситуаций

Основные этапы решения задачи идентификации производственных ситуаций в системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Основные этапы решения задачи идентификации производственных ситуаций *The stages of problem solving of identifying production situations*

Этап №	Наименование этапа
1	Классификация характеристик производственных ситуаций
2	Выбор функции сходства для сравнения текстовых характеристик
3	Выбор функции сходства для сравнения временных характеристик
4	Выбор функции сходства для сравнения графовых и числовых характеристик
5	Выбор функции сходства для сравнения наименований ситуаций
6	Выбор метрики пространства производственных ситуаций
7	Определение близости возникшей ситуации к уже происходившим ситуациям

Таблица 2
Table 2

Классификация характеристик типовых производственных ситуаций *Characteristics classification of typical production situations*

Характеристики типовых ситуаций	Символьное обозначение	Представление информации	Классификационная группа
Наименование ситуации	$Name(t)$	В виде текста	D
Причина возникновения	$Reason(t)$	В виде текста	A
Подразделения предприятия, затронутые ситуацией	$Division(t)$	В виде текста	A
Последствия ситуации	$Consequence(t)$	В виде текста	A
Время начала и окончания	$Time(t)$	В числовом виде	B
Документы, необходимые ЛПР для принятия решения	$Documents(t)$	В виде текста	A
Качественные показатели работы предприятия, влияющие на ситуацию	$A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t)$	В виде текста	A
Действия, ликвидирующие ситуацию	$Action(t)$	В виде орграфов	C
Количественные показатели работы предприятия	$Data(t)$	В числовом виде	E

Для ее решения была разработана математическая модель, позволяющая определить расстояния между текущей производственной ситуацией и ситуациями, хранящимися в базе данных предприятия. Для определения расстояния между двумя произвольными производственными ситуациями $S_1(t), S_2(t) \in \{S(t)\}$ необходимо предварительно определить функции, устанавливающие степень сходства между характеристиками этих ситуаций (табл. 2).

Для этого разобьем характеристики множества (1) на пять подмножеств, первое из которых содержит текстовую информацию, второе — время возникновения и окончания производственной ситуации, третье содержит ориентированные графы, используемые ЛПР в процессе подготовки и принятия решения. В четвертом подмножестве хранятся названия производственных ситуаций, в пятом — количественные показатели производственного процесса, учитываемые ЛПР при подготовке и принятии решения. Рассмотрим процедуру формирования функций сходства для каждого из указанных подмножеств, а затем, на основании этих функций, сформируем метрику, определяющую расстояние между сравниваемыми производственными ситуациями $S_1(t), S_2(t) \in \{S(t)\}$.

Для определения сходства между характеристиками второй группы ($Time$) была выбрана функция

$$\Psi_2(S_1, S_2) = 1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}},$$

которая имеет следующие свойства: монотонно возрастает с увеличением степени сходства между сравниваемыми характеристиками; $\Psi_2 = 0$ при полном отсутствии сходства (при $\Delta t = \Delta t_{\max}$); $\Psi_2 = 1$ при наибольшем сходстве (при $\Delta t = 0$).

Характеристики третьей группы ($Action$) представляют собой графы. Для определения функции сходства $\Psi_3(S_1, S_2)$ здесь используются методы количественного анализа, основанные на оценке степени совпадения множеств вершин, дуг и весов дуг у сравниваемых графов. Данные методы подробно рассмотрены в специальной литературе.

Характеристики четвертой группы ($Name$) представляют собой наименования ситуаций $S_1(t), S_2(t) \in \{S(t)\}$, хранящиеся в памяти вычислительного комплекса в виде текстовой информации. Функция сходства между сравниваемыми характеристиками производственных ситуаций имеет следующий вид:

$$\Psi_4(S_1, S_2) = \begin{cases} 1, & \text{при совпадении} \\ & \text{Name}(S_1(t)) \text{ и } \text{Name}(S_2(t)); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

$\Psi_4(S_1, S_2)$ принимает значение 1, если существует полное совпадение между именами сравниваемых характеристик, или 0, если оно отсутствует.

Расстояние между характеристиками пятой группы определяется по формуле

$$\Psi_5(Data(S_1(t)), Data(S_2(t))) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{S_1} - x_{S_2})_k^2 \eta_k}.$$

Здесь η_k , $k = \overline{1, m}$, — весовые коэффициенты, характеризующие степень влияния количественных характеристик ситуаций $S_1(t)$, $S_2(t)$ на процесс принятия решений.

В качестве функций сходства для характеристик первого подмножества (*Reason, Consequence, Division, Documents*) может быть использован один из приведенных ниже показателей, которые традиционно используются в информационных поисковых системах для сравнения степени совпадения текстовых документов:

$$\left\{ \begin{aligned} \Psi_1^1(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{2 \left(\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk} \right)}{\sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk}}, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} = 0; \end{cases} \\ \Psi_1^2(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}{\sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} - \sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}, & \\ \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} - \sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} - \sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk} = 0; \end{cases} \\ \Psi_1^3(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n t_{ik}^2 + \sum_{k=1}^n t_{jk}^2}}, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} \neq 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} = 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} = 0; \end{cases} \\ \Psi_1^4(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}{\min \left(\sum_{k=1}^n t_{ik}^2, \sum_{k=1}^n t_{jk}^2 \right)}, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} \neq 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} = 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} = 0; \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где n — число ключевых слов, характеризующих текстовую характеристику; t_{ik} , t_{jk} — переменные, определяющие наличие ($t_{ik} = 1$, $t_{jk} = 1$) или отсутствие ($t_{ik} = 0$, $t_{jk} = 0$) k -го ключевого слова в тексте сравниваемых характеристик, соответственно; $\Psi_i^i(S_1, S_2)$, $i = \overline{1, 4}$, — коэффициенты, характеризующие степень совпадения сравниваемых характеристик.

Функции сходства различных характеристик сравниваемых ситуаций Ψ_i , $i = \overline{1, 9}$, входят в состав метрики ρ_S , определяющей расстояние между $S_1(t)$, $S_2(t) \in \{S(t)\}$ в пространстве производственных ситуаций. При ее формировании принималось во внимание, что $\rho_S(S_1(t), S_2(t))$ должна быть действительной числовой функцией, для которой выполняются известные аксиомы метрики:

$$\begin{aligned} \rho_S(S_1(t), S_2(t)) &= \\ &= \left(G^2 \mu_2 + I^2 \mu_3 + B^2 \mu_4 + \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}} \right)^2 \mu_5 + \right. \\ &\quad \left. + R^2 \mu_6 + T^2 \mu_7 + P^2 \mu_8 + M^2 \mu_9 \right)^{1/2} / 8, \end{aligned} \quad (4)$$

где $G = \frac{\sum_{k=1}^n m_{2,S_1,k} m_{2,S_2,k}}{\sum_{k=1}^n m_{2,S_1,k}^2 \sum_{k=1}^n m_{2,S_2,k}^2}$ — функция сравнения причин;

$I = \frac{2 \left(\sum_{k=1}^n m_{3,S_1,k} m_{3,S_2,k} \right)}{\sum_{k=1}^n m_{3,S_1,k}^2 + \sum_{k=1}^n m_{3,S_2,k}^2}$ — функция сравнения последствий;

$B = \frac{\sum_{k=1}^n m_{4,S_1,k} m_{4,S_2,k}}{\min \left(\sum_{k=1}^n m_{4,S_1,k}^2, \sum_{k=1}^n m_{4,S_2,k}^2 \right)}$ — функций сравнения подразделений;

$1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}}$ — функция сравнения длительности;

$R = \frac{\sum_{k=1}^n m_{6,S_1,k} m_{6,S_2,k}}{\sum_{k=1}^n m_{6,S_1,k}^2 + \sum_{k=1}^n m_{6,S_2,k}^2 - \sum_{k=1}^n m_{6,S_1,k} m_{6,S_2,k}}$ — функция сравнения документов;

$T = \sqrt{\sum_{k=1}^l ((x_{s_1,k} - x_{s_2,k})^2 \eta_k)^2}$ — функция сравнения количественных показателей;

$P = \zeta_1 \left| \frac{U_{s_1} \cap U_{s_2}}{U_{s_1} \cup U_{s_2}} \right| + \zeta_1 \left| \frac{E_{s_1} \cap E_{s_2}}{E_{s_1} \cup E_{s_2}} \right| + \zeta_1 \left| \frac{Q_{s_1} \cap Q_{s_2}}{Q_{s_1} \cup Q_{s_2}} \right|$ — функция сравнения графов мероприятий;

$$M = \frac{\sum_{k=1}^n m_{9,S_1,k} m_{9,S_2,k}}{\min \left(\sum_{k=1}^n m_{9,S_1,k}^2, \sum_{k=1}^n m_{9,S_2,k}^2 \right)} - \text{функция сравнения качественных показателей.}$$

В качестве функции, заведомо обладающей данными свойствами, было выбрано расстояние риманова пространства, определяемое по формуле

$$\rho_S(S_1(t), S_2(t)) = \left[\sum_{k=1}^9 \Psi_k^2 \mu_k \right]^{1/2}$$

($\mu_k, k = \overline{1,9}$, — весовые коэффициенты, определяемые экспертами).

Разработанная методика определения расстояния между различными производственными ситуациями, возникающими в процессе функционирования объекта управления, позволила сформировать ряд новых алгоритмов, использованных при оперативной идентификации производственных ситуаций и поиске данных в информационных системах интегрированного авиаремонтного предприятия.

Алгоритм решения задачи

Начало алгоритма.

Шаг 1. Просмотр и актуализация списка производственных ситуаций, контролируемых средствами вычислительной техники.

Шаг 2. Новая производственная ситуация возникла? Если "нет", то переход к концу алгоритма. Если "да", то переход к шагу 3.

Шаг 3. Определение характеристик новой производственной ситуации.

Шаг 4. Сравнение характеристик новой производственной ситуации с соответствующими характеристиками ситуаций, занесенных в базу данных.

Шаг 5. Есть ли полное совпадение новой ситуации с ситуацией из базы данных? Если "да", то выдача ЛПР перечня документов, данных и рекомендаций, необходимых для принятия адекватных управленческих решений. Затем переход к концу алгоритма. Если "нет", то переход к шагу 6.

Шаг 6. Упорядочивание списка ситуаций базы данных по убыванию степени близости к новой ситуации с использованием метрики (4).

Шаг 7. Присвоение счетчику ситуаций упорядоченного списка значения 1 ($I = 1$).

Шаг 8. Выдача ЛПР перечня документов, данных и рекомендаций по I -й ситуации.

Шаг 9. ЛПР считает полученную информацию достаточной для принятия управленческих решений? Если да, то принятие решения и переход к шагу 13. Если "нет", то переход к шагу 10.

Шаг 10. Увеличение счетчика ситуаций на единицу, т. е. $I = I + 1$.

Шаг 11. Все ситуации списка просмотрены? Если "да", то выдача сообщения ЛПР "Дополнительной информации нет", принятие решения по уже представленной информации и переход к шагу 13. Если "нет", то переход к шагу 12.

Шаг 12. Переход к шагу 9.

Шаг 13. Уточненная информация по данным, документам и рекомендациям, использованным управленческим персоналом в процессе принятия решения, заносится экспертами в память компьютера, и новая ситуация включается в базу данных системы управления.

Конец алгоритма.

Модельный пример

Описание новой ситуации S_1 . При доставке морским транспортом во время шторма произошло смещение и опрокидывание открытого морского контейнера с вертолетом Ми-8МТВ-1. В результате опрокидывания фюзеляж вертолета получил значительные повреждения отсека фюзеляжа заднего 8МТ.0350.000 с разрушением шпангоутов № 18, 19, 20, 21, 22, 23 с деформаций обшивки и стрингеров. После визуальной оценки степени повреждения вертолета было проведено его нивелирование. По результатам нивелирования выявлено отклонение точки № 25 от продольной оси симметрии вертолета на 35 мм (вправо). По положению точек допускается отклонение ± 30 мм. Точка № 20 отстоит от базы по вертикали на 1164 мм. Занижение составляет 53 мм.

Проведение нивелировочных работ не потребовало транспортировки вертолета на авиационное ремонтное предприятие. Они были выполнены по прибытию в порт специалистом предприятия, использовавшим при проведении работ оригинальный информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов [12—16].

В базе данных информационно-измерительного комплекса хранится информация по прецедентам, с которыми сравнивалась новая ситуация S_1 . В базе данных информационной системы

хранится информация по 10 ситуациям, связанным с деформацией корпуса вертолета: S_2 — деформация узла шасси левого; S_3 — деформация узла шасси правого; S_4 — деформация стабилизатора левого; S_5 — деформация стабилизатора правого; S_6 — деформация хвостовой балки; S_7 — деформация хвостовой балки и вала; S_8 — деформация концевой балки; S_9 — деформация центральной части фюзеляжа; S_{10} — деформация кабины; S_{11} — деформация гаргрота.

С этими ситуациями сравнивалась возникшая новая ситуация S_1 — падение вертолета из контейнера при транспортировке. Результаты сравнения были показаны в виде лепестковых диаграмм на рис. 5 (см. вторую сторону обложки) и занесены в табл. 3. Рассмотрим более подробно процесс формирования этой таблицы для первых двух строк.

Формирование первой строки таблицы. При формировании первой строки таблицы характеристики ситуации S_1 сравниваются сами с собой, поэтому результатом является полное совпадение, и табл. 3 в первой строке записаны единицы.

Формирование второй строки таблицы. Во второй строке таблицы приведены результаты попарного сравнения ситуаций S_1 и S_2 . Для упрощения расчетов при сравнении всех текстовых характеристик используется коэффициент Дайса $\Psi_1^i(S_1, S_2)$.

Сравниваются характеристики "Причина возникновения (*Reason*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 20 ключевыми словами. Совпадение характеристик установлено по семи ключевым словам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(7)}{(25 + 25)} = 0,28.$$

Сравниваются характеристики "Подразделения предприятия, затронутые ситуацией (*Division*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 25 ключевыми словами. Совпадение характеристик установлено по 12 ключевым словам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(12)}{(25 + 25)} = 0,48.$$

Сравниваются характеристики "Последствия ситуации (*Consequence*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 25 ключевыми словами. Совпадение характеристик установлено по 14 ключевым словам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(14)}{(25 + 25)} = 0,56.$$

Сравниваются характеристики "Время начала и окончания (*Consequence*)". По формуле $1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}}$ при $\Delta t_{\max} = 1$ и $\Delta t = 0,93$ имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{1 - 0,93}{1} = 0,07.$$

Сравниваются характеристики "Документы, необходимые ЛПР для принятия решения (*Documentis*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 100 наименованиями документов. Совпадение характеристик установлено по 67 документам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(67)}{(100 + 100)} = 0,67.$$

Сравниваются характеристики "Действия, ликвидирующие ситуацию (*Action*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 50 различными мероприятиями. Совпадение характеристик установлено по 27 мероприятиям. По формуле (2) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(27)}{(50 + 50)} = 0,54.$$

Сравниваются характеристики "Количественные показатели работы предприятия (*Data*)". Для 34 количественных показателей при весовых коэффициентах, равных $1/34$ каждый, имеем

$$\Psi_4(Data(S_1), Data(S_2)) = 0,24.$$

В итоге, воспользовавшись формулой (4), при равных весовых коэффициентах $\mu_i = \frac{1}{7}$, $i = \overline{1,7}$, а также при $M^2\mu_9 = 0$ имеем

$$\begin{aligned} \rho_S(S_1, S_2) &= \left(G^2\mu_2 + I^2\mu_3 + B^2\mu_4 + \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}} \right)^2 \mu_5 + R^2\mu_6 + T^2\mu_7 + P^2\mu_8 \right)^{1/2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,1225}{7} + \frac{0,0576}{7} + \frac{0,0784}{7} + \frac{0,0049}{7} + \frac{0,4489}{7} + \frac{0,2916}{7} + \frac{0,0576}{7} \right)} = 0,3894. \end{aligned}$$

Степень сходства сравниваемых ситуаций
The degree of compared situations similarity

Наименование ситуации (Name)	Результаты сравнения характеристик новой ситуации с характеристиками типовых ситуаций из БД								Совпадение ситуаций из БД с новой ситуацией
	Reason	Division	Consequence	Time	Documents	Quality indicators	Action	Data	
Новая ситуация: падение вертолета из контейнера при транспортировке (S_1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Деформация узла шасси левого (S_2)	0,28	0,48	0,56	0,07	0,67	—	0,54	0,24	0,3643
Деформация узла шасси правого (S_3)	0,12	0,24	0,16	0,56	0,78	—	0,69	0,93	0,5432
Деформация стабилизатора левого (S_4)	0,49	0,73	0,59	0,45	0,65	—	0,56	0,15	0,5101
Деформация стабилизатора правого (S_5)	0,54	0,73	0,47	0,23	0,34	—	0,89	0,23	0,5227
Деформация хвостовой балки (S_6)	0,35	0,54	0,13	0,25	0,23	—	0,23	0,29	0,2927
Деформация хвостовой балки и вала (S_7)	0,17	0,59	0,47	0,63	0,38	—	0,53	0,26	0,4345
Деформация концевой балки (S_8)	0,48	0,65	0,11	0,13	0,57	—	0,15	0,13	0,3616
Деформация центральной части фюзеляжа (S_9)	0,79	0,85	0,69	0,49	0,82	—	0,79	0,68	0,6916
Деформация кабины (S_{10})	0,37	0,85	0,59	0,53	0,67	—	0,89	0,59	0,6344
Деформация гаргрота (S_{11})	0,29	0,27	0,17	0,18	0,23	—	0,34	0,34	0,1841

Таблица 4
Table 4

Основные показатели эффективности внедрения
Key performance indicators of implementation

Максимальное время обнаружения (мин)		Среднее время реакции на обнаруженную ситуацию (мин)		Число своевременно обнаруженных ситуаций (шт.)		Число ошибочных управлений диспетчера (шт.)	
До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения
360	60	55...40	25...15	25	4...7	>50	<5

Результаты расчетов занесены во вторую строку табл. 3. Аналогично формируются и остальные строки этой таблицы. Степень сходства новой ситуации S_1 и типовых ситуаций количественно охарактеризована в табл. 3.

Специалист авиационного ремонтного предприятия, командированный в порт для предварительной оценки возникшей ситуации, пересылает на предприятие результаты проведенных замеров и расчетов с указанием ситуаций, наиболее близких к возникшей ситуации. В данном случае наиболее близкими к S_1 будут ситуации S_9 — деформация центральной части фюзеляжа — и S_{10} — деформация кабины. После выполненных сравнений информационно-измерительный комплекс выдает на экран информацию, характеризующую степень близости возникшей ситуации S_1 к ситуациям (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

Здесь S_1 — новая ситуация; S_2 — деформация узла левого шасси; S_3 — деформация узла правого шасси; S_4 — деформация левого стабилизатора; S_5 — деформация правого стабилизатора; S_6 — деформация хвостовой балки; S_7 — деформация хвостовой балки и вала; S_8 —

деформация концевой балки; S_9 — деформация центральной части фюзеляжа; S_{10} — деформация кабины; S_{11} — деформация гаргрота.

Использование разработанного математического и программного обеспечения позволило повысить качество управленческих решений. Используемый информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов позволил получить конкурентные преимущества в отношении других авиаремонтных предприятий и организаций (табл. 4).

Заключение

В статье предложена и обоснована новая методика оперативной идентификации аварийных ситуаций в системах управления авиационных ремонтных предприятий, осуществляющих ремонт вертолетов Ми-8 и модификаций. Методика основана на идее формирования метрического пространства аварийных ситуаций и определении расстояния между его точками по формулам, традиционно используемым в системах распознавания образов при оценке сходства между сравни-

ваемыми информационными объектами. Разработан информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов. Предложено и обосновано тиражируемое информационно-программное обеспечение, позволяющее осуществить внедрение основных результатов статьи в состав систем управления производственными процессами авиационного ремонтного предприятия.

Список литературы

1. Аветисян Ю. А., Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Родичев В. А. Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 43–47.
2. Воробьев В. Г., Глухов В. В., Козлов Ю. В. Диагностика и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования. М.: Транспорт, 1984. 182 с.
3. Добрынин А. С., Гудков М. Ю., Койнов Р. С. Прецедентный подход к управлению инцидентами в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Программные системы и вычислительные методы. 2020. № 2. С. 45–52. DOI: 10.7256/2454-0714.2020.2.31040
4. Зуев В. Е., Фадеев В. Я. Лазерные навигационные устройства. М.: Радио и связь, 1987. 160 с.
5. Инструкция по технической эксплуатации вертолета МИ-8. Книга 4. С. 45–57.
6. Марков А. И., Кушников В. А. Задача оперативного диагностирования дефектов фюзеляжа вертолета МИ-8 при

проведении предварительной оценки его ремонтпригодности // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2012. С. 95–101.

7. Марков А. И., Кушников В. А. Задачи, модели и алгоритмы управления ремонтом вертолетов на авиационном ремонтном предприятии // Естественные и технические науки. № 3 (59). 2012. С. 272–274.
8. Нормы летной годности гражданских вертолетов. М.: Изд. ЦАГИ, 1987. 350 с.
9. Поспелов Г. С., Ириков В. А. Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976. 440 с.
10. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981 г. 220 с.
11. Фейгенбаум Э., Фельдмана Дж. Вычислительные машины и мышление, М.: Мир, 1967 г. 552 с.
12. Akhmetov, A., Shkolnikova E. The development of methods for assessing the reliability of new aircraft and engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 421, Iss. 1. P. 120–130.
13. Amin M., Raza K., Khan S. Maintenance practices and challenges facing aviation industry in Pakistan // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2019. Vol. 25, Iss. 1. P. 75–87.
14. Borisov V., Boldyrev S., Sotnikova N. Efficiency of the Aviation Enterprises Activity: The Russian Experience // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1236, Iss. 1. P. 128–137.
15. Hamdaoui M., Korichi S., Ben L. Improvement of Decision Making by Implementing a Risk Management System in Aircraft Maintenance // International Journal of Engineering & Technology. 2019. Vol. 8, Iss. 1.1. P. 276–279.
16. Porter B., Bareiss R., Holte R. C. Concept learning and heuristic classification in weak-theory domains // Artificial Intelligence. 1990. Vol. 45, Iss. 1–2. P. 229–263.

The Problem of Production Situations Identification in the Systems of Production Processes Management of an Aircraft Repair Enterprise

V. A. Kushnikov, kushnikoff@yandex.ru, A. S. Bogomolov, alexbogomolov@yandex.ru,

V. A. Ivashenko, ivaipmtu@yandex.ru, A. D. Selyutin, aseliutin@ya99.ru,

Federal State Budgetary Institution Federal Research Centre "Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", Saratov, 410028, Russian Federation,

A. F. Rezchikov, rw4cy@mail.ru,

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation,

E. V. Kushnikova, lkushnikova@yandex.ru,

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation,

A. I. Markov, 8markov8@gmail.com,

Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation

Corresponding author: Selyutin A. D., Postgraduate Student, Federal State Budgetary Institution Federal Research Centre "Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", Saratov, 410028, Russian Federation, e-mail: aseliutin@ya99.ru

Accepted on April 17, 2023

Abstract

This research provides a new approach to solving the problem of identifying emergency situations in the processes of aircraft repair work by forming a metric space of emergency situations and determining the distance between its points. The main stages of repair of Mi-8 helicopters and their modifications at a typical aircraft repair facility are described. The main stages of solving the problem of identifying production situations are determined. Model has been formed to classify the characteristics of production situations that arise during the repair of Mi-8 helicopters. When analyzing the production situation, it is compared with known situations recorded in the database. If its complete coincidence with known situations is found in the metric space of production situations, then the situation is considered known, the decision maker is issued a list of documents. Otherwise, in the metric space of situations, the point closest to the situation that has arisen is deter-

mined, and management personnel are given documents. After the end of the production situation, the updated information on the data, documents and recommendations used by the management personnel in the decision-making process is entered by experts into the computer memory, and the situation itself is included in the database used by the management system. A software package has been developed as part of the production process management systems of an aircraft repair company. The efficiency indicators of the implementation of the identification system of complex production situations at the enterprise are determined.

Keywords: aircraft repair enterprise, case management, safety, identification, fuselage, metric space, classification of production situations, degree of similarity, helicopter, transportation

For citation:

Kushnikov V. A., Bogomolov A. S., Ivashenko V. A., Selyutin A. D., Rezhnikov A. F., Kushnikova E. V., Markov A. I. The Problem of Production Situations Identification in the Systems of Production Processes Management of an Aircraft Repair Enterprise, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 451–461 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.451-461

References

1. Avetisyan Y. A., Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Rodichev V. A. Mathematical models and algorithms for operational management of emergency response processes, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2009, no. 11, pp. 43–47 (in Russian).
2. Vorobyev V. G., Gluhov V. V., Kozlov U. V. Diagnostics and forecasting of the technical condition of aviation equipment, Moscow, Transport, 1984, 182 p. (in Russian).
3. Dobrynin A. S., Gudkov M. U., Koinov R. S. A case-based approach to incident management in automated process control systems. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2020, no. 2, pp. 45–52, DOI: 10.7256/2454-0714.2020.2.31040 (in Russian)
4. Zuev V. E., Fadeev V. Ya. Laser navigation devices, Moscow, Radio i svyaz, 1987, 160 p. (in Russian).
5. **Instructions** for the technical operation of the MI-8 helicopter, vol. 4, pp. 45–57 (in Russian).
6. Markov A. I., Kushnikov V. A. The task of rapid diagnosis of defects in the fuselage of the MI-8 helicopter during a preliminary assessment of its maintainability, *Izvestiya vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 95–101 (in Russian).
7. Markov A. I., Kushnikov V. A. Tasks, models and algorithms of helicopter repair management at an aviation repair company, *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 272–274 (in Russian).
8. **Airworthiness** standards of civil helicopters, Moscow, *Izd. TSAGI*, 1987, 350 p. (in Russian).
9. Pospelov G. S., Irikov V. A. Program-target planning and management, Moscow, Sovetskoe radio, 1976 (in Russian).
10. Pospelov D. A. Logical-linguistic models in control systems, Moscow, Energoizdat, 1981, 220 p. (in Russian).
11. Feigenbaum A., Feldman J. Computing machines and thinking, Moscow, Mir, 1967, 552 p. (in Russian).
12. Akhmetov, A., Shkolnikova E. The development of methods for assessing the reliability of new aircraft and engines, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 421, iss. 1, pp. 120–130.
13. Amin M., Raza K., Khan S. Maintenance practices and challenges facing aviation industry in Pakistan, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2019, vol. 25, iss. 1, pp. 75–87.
14. Borisov V., Boldyrev S., Sotnikova N. Efficiency of the Aviation Enterprises Activity, *The Russian Experience, Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1236, iss. 1, 2019, pp. 128–137.
15. Hamdaoui M., Korichi S., Ben L. Improvement of Decision Making by Implementing a Risk Management System in Aircraft Maintenance, *International Journal of Engineering & Technology*, 2019, vol. 8, iss. 1.1, pp. 276–279.
16. Porter B., Bareiss R. Holte R. C. Concept learning and heuristic classification in weak-theory domains, *Artificial Intelligence*, 1990, vol. 45, iss. 1–2, pp. 229–263.

N. L. Dembitsky, dembitsky@mai.ru,

Moscow Aviation Institute, Institute No. 4 "Radioelectronics, Infocommunications and Information Security",
Moscow, 125993, Russian Federation

*Corresponding author: Dembitsky N. L., Associate Professor, Ph.D.,
National Research University Moscow Aviation Institute, Institute No. 4 "Radioelectronics,
Infocommunications and Information Security Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: dembitsky@mai.ru*

Accepted on May 31, 2023

Built-in Analog Automatic Controls for Small Robots

Abstract

One of the most promising methods for improving control efficiency is the parallel synthesis of commands by a group of computing devices. However, delays in digital-to-analog conversions and software processing, the need to synchronize calculations, and signal transmission coordination prevent the achievement of maximum performance in distributed systems. Problems can be solved by increasing the power of embedded microprocessors. This leads to an undesirable increase in design complexity, energy consumption, and dimensions of controls. For the miniaturization of embedded control systems, the article proposes to apply the principles of the indivisibility of physical processes in a technical system and the execution of control commands based on the functional combination of aggregates with analog logic devices (agents). A generalized model of changing the states of a technical system is considered, which sets the principles for switching on or off groups of units. The concept of an automaton of ternary logic is introduced, which determines the order of interaction of aggregates in the time domain. The synthesis of the block diagram of the automaton is carried out. In the mathematical model of the automaton, the operations of ternary logic receive a specific physical content in the form of retrospective processing of changes in the states of aggregates. It is shown that ternary logic automata can be combined into open and closed chains, setting hardware control algorithms units robot. The circuits for connecting automata controlled by elements of asynchronous logic are given. When connected in series, the automata control the order of switching on and off the units. Chains of three-valued logic automata can be arbitrarily long, determining the behavior of the system in the process of its operation. Due to the rejection of program control, such automata can operate in real time, limited only by the delay of signals in logic elements. An important advantage of the proposed technical solution is the unification of the automatic control system. The simplicity of the design of devices and the absence of additional add-ons make it possible to integrate such circuits into the controls of microminiature robots, reducing their weight and size parameters. Promising areas of application of analog automata are microelectromechanical and microelectronic devices.

Keywords: embedded systems, analog automata, sequential analog logic, ternary logic, microelectromechanical systems, microelectronic control systems

For citation:

Dembitsky N. L. Built-in Analog Automatic Controls for Small Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 462–468.

DOI: 10.17587/mau.24.462-468

УДК 681.5.01

DOI: 10.17587/mau.24.462-468

Н. Л. Дембицкий, канд. техн. наук, доц., dembitsky@mai.ru,
Московский авиационный институт (НИУ)

Встроенная аналоговая автоматика для малоразмерных роботов

Одним из наиболее перспективных методов повышения эффективности управления является параллельный синтез команд группой вычислительных устройств. Однако задержки цифро-аналоговых преобразований и программной обработки, необходимость синхронизации вычислений, согласование передачи сигналов препятствуют достижению максимального быстродействия в распределенных системах. Проблемы могут решаться повышением мощности встроенных микропроцессоров. Это приводит к нежелательному увеличению конструктивной сложности, энергопо-

требления, габаритных размеров органов управления. Для миниатюризации встроенных систем управления в статье предлагается применить принципы неделимости физических процессов в технической системе и исполнения команд управления на основе функционального объединения агрегатов с аналоговыми логическими устройствами (агентами). Рассматривается обобщенная модель смены состояний технической системы, которая задает принципы включения или отключения групп агрегатов. Вводится понятие автомата троичной логики, определяющего порядок взаимодействия агрегатов во временной области. Выполнен синтез структурной схемы автомата. В математической модели автомата операции троичной логики получают конкретное физическое наполнение в виде ретроспективной обработки изменений состояний агрегатов. Показано, что автоматы троичной логики могут объединяться в разомкнутые и замкнутые цепочки, задавая аппаратные алгоритмы управления агрегатами роботов. Приведены схемы соединения автоматов, управляемые элементами асинхронной логики. При последовательном соединении автоматы управляют порядком включения и отключения агрегатов. Цепочки автоматов трехзначной логики могут быть сколь угодно длинными, определяя поведение системы в процессе ее функционирования. Благодаря отказу от программного управления такие автоматы могут работать в режиме реального времени, ограниченного только задержкой сигналов в логических элементах. Важным преимуществом предложенного технического решения является унификация системы управления автоматами. Простота исполнения устройств и отсутствие дополнительных надстроек позволяет встраивать такие схемы в органы управления микроминиатюрных роботов, снижая их массогабаритные параметры. Перспективными областями применения аналоговых автоматов являются микроэлектромеханические и микроэлектронные устройства.

Ключевые слова: встраиваемые системы, аналоговые автоматы, последовательная аналоговая логика, троичная логика, микроэлектромеханические системы, микроэлектронные системы управления

Introduction

Software control is the basis of modern automatic control systems. Control algorithms must accurately and promptly respond to changes in external influences. The role of instructions embedded in the program code is growing sharply, and the requirements for speed and reliability of their execution are becoming more stringent. [1]. The combination of complexity of algorithms with restrictions on weight and size parameters causes especially acute problems in the development of computer control of small-sized objects [2].

One of the effective creation of complex control algorithms is the use of embedded systems that have the efficiency of decision-making, increased reliability during operation and reduced development complexity through the use of an evolutionary increase in functional complexity [3–5]. However, in the digital version, this technical solution has certain limitations due to the peculiarities of the operation of microprocessors. Parallel execution of commands by several technical system control aggregates requires their coordinated work [6–8]. Synchronization of calculations, mandatory ADC stages, coordination of controller interaction protocols lead to delays, and high energy costs and an increase in the total complexity of computing devices lead to an increase in weight and size characteristics. This approach becomes especially unacceptable when creating of microelectromechanical systems [9, 10]. The development of highly sensitive microsensors, spatial orientation devices, micromechanical gearboxes creates the prerequisites for the development of new methods of algorithmic control

of miniature objects, in which the size and weight of computing devices can become a determining factor [11–13].

This article proposes a way to overcome the above problems of distributed control systems for aggregates, the principles of constructing compact reactive systems are considered [14]. Their feature is the reaction to changes in the parameters of the control object in real time. The solution was obtained by integrating the functional-logical control system into the aggregates of the technical system. The purpose of the work is to create a high-speed distributed control network in the conditions of restrictions on the weight and size parameters of the technical system.

Consider a technical system (TS) consisting of a set of interacting aggregates A . Let us assume that the functioning of such a TS can be represented as a deterministic sequence of processes of various physical nature. For example, the operation of an internal combustion engine involves mechanical, electrical and thermal processes associated with the movement of the piston, ignition and combustion of fuel.

The sequence of processes execution is influenced by various external and internal factors that change the modes and algorithms of the control units. To build a generalized model of changing states, we represent the TS in the form of three sets, the structure of which is capable of continuously changing at each moment of time:

- a set of working aggregates $A(t)$ of the technical system;
- the set of energy flows (EF) synthesized by the aggregates at time t ;
- set of EF parameters $X(t)$.

At each moment of time, a certain group of aggregates $A(t)$ is in the active state, determining the mode of operation of the TS. Changes in the values of the energy flows parameters lead to the activation or deactivation of the aggregates. This, in turn, causes a change in the set of energy flows circulating in the network. Changes in the energy flow affect many parameters characterizing the state of the TS.

We will assume that all the listed events occur continuously, affecting the structural, flow and event dynamics of the TS. The dynamic connections of the structural and parametric states of the TS generate a sequential logic of turning on/off the aggregates, which must exist in the time continuum of the functional dynamics of the processes occurring in the TS. To establish a clear interaction between processes, we apply a mathematical apparatus that determines the methods of sequencing and venjunction in the logic of connecting aggregates when changing the states of the vehicle.

In the sequential logic of digital automata, changes are determined by the states before the arrival of the signal and after its arrival. However, these two states do not fully convey the dynamics of changes occurring in the TS. Often, events are associated not only with current processes, but are also determined by previous states of the system. Under the conditions of program control, such problems are solved quite simply. If, in order to increase the efficiency of control, the software component is abandoned, then hardware circuits of the built-in sequential logic will be required. The creation of unified models for successive queues for connecting automata will make it possible to create hardware control algorithms. The developed methods should link the event dynamics of changes in the parameters of EFs with structural changes in the TS. To do this, it is necessary to determine the conditions and rules for the control logic of continuous processes in the TS.

Ternary Parametric Logic for Process Switching

We will evaluate the operation of aggregate automata in three states: the aggregate has not yet connected to the network, the aggregate is working and transfers EF to the network, the aggregate has completed its work and is disconnected from the network. In this aspect, the task of analyzing the operation of the TS will require a transition from binary to ternary logic, in which each process is allocated three consecutive states: "not performed", "in progress", "completed".

To define the logical operations on the EF, we introduce the concept of a physical processor (PhP), which in a distributed system we mean the union of the aggregate and the control body (agent). In the PhP, the aggregate performs transformations and transfers to the EF network, and the agent analyzes the conditions for connecting the aggregate, controls the EF conversion modes and transmits information about the state of the aggregate to the network.

A ternary logic automaton (TLA) consists of three PhPs π_α , π_β , π_γ (Fig. 1), the inputs of which receive activating EFs α^- , β^- , γ^- . Each PhP in TLA controls the connection of its aggregate to the network. The aggregates transmit EFs α^+ , β^+ , γ^+ to the outputs of the PhPs.

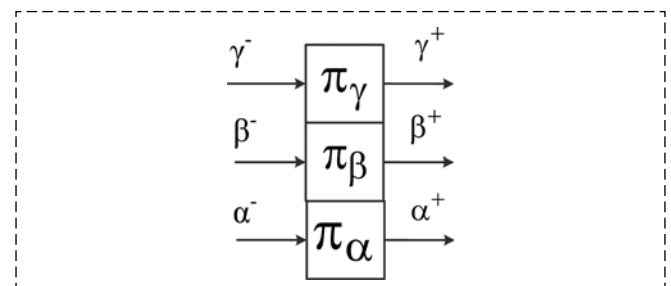


Fig. 1. Conventional designation of the ternary logic automaton

TLA can be in three consecutive states:

a) $r(\pi_\alpha) \in \mathcal{R}(t), r(\pi_\beta) \notin \mathcal{R}(t), r(\pi_\gamma) \notin \mathcal{R}(t)$, EF transfer α^+ ;

b) $r(\pi_\alpha) \notin \mathcal{R}(t), r(\pi_\beta) \in \mathcal{R}(t), r(\pi_\gamma) \notin \mathcal{R}(t)$, EF transfer β^+ ;

c) $r(\pi_\alpha) \notin \mathcal{R}(t), r(\pi_\beta) \notin \mathcal{R}(t), r(\pi_\gamma) \in \mathcal{R}(t)$, EF transfer γ^+ ,

where $r(\pi_\alpha)$, $r(\pi_\beta)$, $r(\pi_\gamma)$ — outgoing EFs of PhP π_α , π_β , π_γ aggregates.

Let us denote by symbols $\mathbb{C}_\alpha$, $\mathbb{C}_\beta$, $\mathbb{C}_\gamma$ the area of definition of the parameters of the incoming EFs α^- , β^- , γ^- . Let us denote by symbols D_α , D_β , D_γ the range of values of outgoing EFs α^+ , β^+ , γ^+ parameters.

Let's write the predicates that establish whether the parameters $\bar{x}_\alpha$, $\bar{x}_\beta$, $\bar{x}_\gamma$ the incoming EFs α^- , β^- , γ^- belong to the areas $\mathbb{C}_\alpha$, $\mathbb{C}_\beta$, $\mathbb{C}_\gamma$:

$$p_\alpha = \{\bar{x}_\alpha \in \mathbb{C}_\alpha\}; \bar{p}_\alpha = \{\bar{x}_\alpha \notin \mathbb{C}_\alpha\}; \quad (1)$$

$$p_\beta = \{\bar{x}_\beta \in \mathbb{C}_\beta\}; \bar{p}_\beta = \{\bar{x}_\beta \notin \mathbb{C}_\beta\}; \quad (2)$$

$$p_\gamma = \{\bar{x}_\gamma \in \mathbb{C}_\gamma\}; \bar{p}_\gamma = \{\bar{x}_\gamma \notin \mathbb{C}_\gamma\}. \quad (3)$$

Let's write down the predicates that establish the belonging of the outgoing EFs α^+ , β^+ , γ^+ parameters to the ranges of values:

Let us consider the conditions for the formation of incoming EFs for connecting the block of PhP π_γ . We will supply two internal streams α^+ , β^+ and one external stream γ^- to the TLA input. Prior to the start of the TLA operation, the EF γ^- parameters are outside the domain of definition, $p_\gamma^- = \text{"FALSE"}$, so the block of PhP π_γ is disconnected from the network. After the start of the TLA operation, the EF γ^- parameters go into the domain $\mathbb{C}_\gamma$ of definition and $p_\gamma^- = \text{"TRUE"}$. The inclusion of the block PD π_γ will occur when the condition is met

$$p'_\gamma = p_\gamma^- \cdot \bar{p}_\alpha^+ \cdot \bar{p}_\beta^+. \quad (8)$$

Using formula (8), we construct a network model for connecting the FP block π_γ (Fig. 5), in which the outgoing EF is formed using logical circuits.

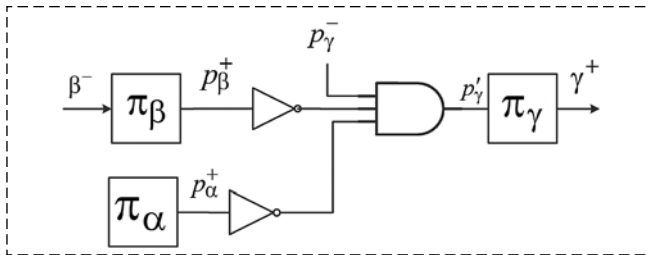


Fig. 5. Fragment of the analog network for connecting aggregate of the PhP π_γ

Combining formulas 5, 7 and 8, we obtain the TLA model (Fig. 1), in which outgoing flows influence the connection of aggregates through predicates in the sequence of execution of rules a, b, c.

From the written conditions for connecting the aggregates, it follows that the main control element is the PhP π_β . Before it is turned on, aggregate of the PhP π_α operates in the network (condition 5). After the activation of β^- is applied to the input of the EF, condition 7 is satisfied, the PhP π_β block is connected, and the blocks of the remaining PhPs are turned off. Violation of condition 7 will lead to the connection aggregate of the PhP π_γ , and aggregate of the PhPs π_α , π_β will be permanently disconnected from the network according to conditions 5, 7. Thus, a strict sequence of events is observed, which generate the ternary TLA switching logic.

Ternary logic determines the successive states of aggregates in the PhP π_α , π_β , π_γ . The active states of the aggregates will be denoted by s_α , s_β , s_γ , and the states of switching off the aggregates $\bar{s}_\alpha$, $\bar{s}_\beta$, $\bar{s}_\gamma$. If we use the advance relation symbol " $\prec$ " and take into account the conditions for connecting the PhP, then the algorithm for asynchronous switching of

aggregates is determined by applying the activation EF β^- to the input of the PhP π_β . We write the process of changing states as an expression

$$s_\alpha, \bar{s}_\beta, \bar{s}_\gamma \prec \bar{s}_\alpha, s_\beta, \bar{s}_\gamma \prec \bar{s}_\alpha, \bar{s}_\beta, s_\gamma. \quad (9)$$

The last state is stable. TLA in this state retains for an arbitrarily long time the fact of turning off the aggregate in the PhP π_β after the completion of the processing of the EF. If a set of TLAs is used in the TS, then for each TLA aggregate information about the completion of work will be stored. The network formed on the TLA set will record transitions from one stable state to another. Such a network can be interpreted as a finite state machine for processing aggregate states.

Information about the state of the network can be transmitted to other TLAs, setting the algorithm for connecting their aggregates. Next, we consider networks that successively change the states of the PhPs included in them.

Sequential algorithms for controlling a network of aggregates of a technical system

Consider a network consisting of the union of two TLAs A_1 and A_2 . TLA A_1 consists of PhPs $\pi_{\alpha 1}$, $\pi_{\beta 1}$, $\pi_{\gamma 1}$, the second TLA A_2 consists of $\pi_{\alpha 2}$, $\pi_{\beta 2}$, $\pi_{\gamma 2}$.

TLA aggregates are activated by internal and external flows. Internal streams are created at the TLA's own outputs, external flows are fed from other TLA's. The incoming EFs β_1 and β_2 control changes in the states of TLA aggregates A_1 and A_2 .

Let us direct the EF γ_1 outgoing from TLA A_1 to the input of the PhP $\pi_{\beta 2}$, and the outgoing EF α_1 to the input of the initial setting of the PhP $\pi_{\gamma 2}$. Then the TLA interaction, according to (5), (7), (8), will be associated with the execution of the following logical expressions:

$$\begin{aligned} p_{\alpha 1} &= (\bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 1}^+ + p_{\alpha 1}^+) \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+ = \overline{\bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 1}^+ \cdot p_{\alpha 1}^+} \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+ \\ p_{\beta 1} &= (\bar{p}_{\beta 1}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 1}^+ + p_{\beta 1}^+) \cdot p_{\beta 1}^- = \overline{(\bar{p}_{\beta 1}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 1}^+) \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+} \cdot p_{\beta 1}^- \\ p_{\gamma 1} &= p_{\gamma 1}^- \cdot \bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+ \\ p_{\alpha 2} &= (\bar{p}_{\alpha 2}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 2}^+ + p_{\alpha 2}^+) \cdot \bar{p}_{\beta 2}^+ = \overline{\bar{p}_{\alpha 2}^+ \cdot \bar{p}_{\beta 2}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 2}^+ \cdot p_{\alpha 2}^+} \cdot \bar{p}_{\beta 2}^+ \\ p_{\beta 2} &= (\bar{p}_{\beta 2}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 2}^+ + p_{\beta 2}^+) \cdot p_{\gamma 1}^+ \cdot p_{\beta 2}^- = \\ &= \overline{(\bar{p}_{\beta 2}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 2}^+) \cdot \bar{p}_{\beta 2}^+} \cdot p_{\gamma 1}^+ \cdot p_{\beta 2}^- \\ p_{\gamma 2} &= \bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\alpha 2}^+ \cdot \bar{p}_{\beta 2}^+ \end{aligned} \quad (10)$$

As a result of the connection of two TLAs, we obtain a network in which aggregates of the PhP $\pi_{\beta 1}$ and $\pi_{\beta 2}$ are connected in series. Let's call such a network a two-link chain of switching aggregates (CSU).

According to (10) in TLA A_2 :

- The block in $\pi_{\beta 2}$ will be connected to the network only if the block in $\pi_{\gamma 1}$ is enabled, i. e. EF stream will appear at its output, and $\beta_2^- = \gamma_1^+$, $p_{\beta 2}^- = \{\text{TRUE}\}$.
- In the initial state $\pi_{\gamma 1}$, according to the switching conditions, TLA A_1 is blocked, so aggregate of the $\pi_{\beta 2}$ will be turned off.
- The aggregate in $\pi_{\gamma 2}$ will be connected to the network only if the aggregate in $\pi_{\alpha 1}$ is turned off, $p_{\gamma 2}^- = \bar{p}_{\alpha 1}^+ = \{\text{TRUE}\}$. This condition guarantees the initial blocking of the aggregate in $\pi_{\gamma 2}$.

Let us designate the states of connection of aggregates in TLA A_1 — $s_{\alpha 1}, s_{\beta 1}, s_{\gamma 1}$, in TLA A_2 — $s_{\alpha 2}, s_{\beta 2}, s_{\gamma 2}$, and the states of disconnection of aggregates, respectively, by symbols $\bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2}$. If we use the advance relation symbol $\prec$, then the algorithm for asynchronous switching of FP states can be written as an expression

$$\begin{aligned} s_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} &\prec \bar{s}_{\alpha 1}, s_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \\ &\prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \\ &\prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, s_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, s_{\gamma 2}. \end{aligned} \quad (11)$$

All transitions in the chain (11) are associated with a change in the state of $\pi_{\beta 1}$ and $\pi_{\beta 2}$, so we can shorten the notation of the sequence:

$$\bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2} \prec s_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2} \prec \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2} \prec \bar{s}_{\beta 1}, s_{\beta 2} \prec \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2}. \quad (12)$$

Let's expand the concept of a sequential PhP switching chain. We will connect additional TLAs to the built CSU on the right. At the $i + 1$ -st step, the extension is performed according to the rules (10) for two TLAs A_i with PhPs $\pi_{\alpha i}, \pi_{\beta i}, \pi_{\gamma i}$ and TLAs A_{i+1} with PhPs $\pi_{\alpha i+1}, \pi_{\beta i+1}, \pi_{\gamma i+1}$.

On Fig. 6 shows a connection diagram of such a chain.

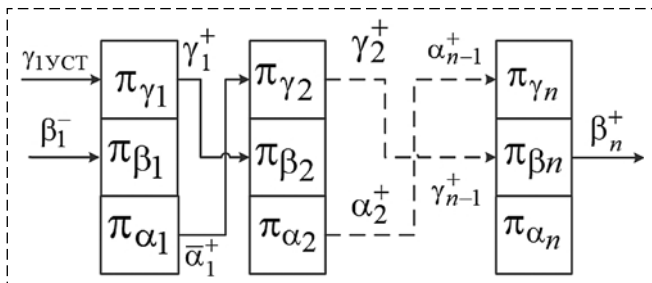


Fig. 6. Series connection of ternary logic automata

Algorithms for cyclic control of an analog network of aggregates of technical systems

The CSU models obtained in the above model provide only one pass through the links and any activating EF β_i do not repeatedly affect the states of the network. To use the CSU again, you will need to completely reset it.

Consider a CSU of two TLAs. TLA A_1 consists of the PhP's $\pi_{\alpha 1}, \pi_{\beta 1}, \pi_{\gamma 1}$, the second A_2 consists of the PhP's $\pi_{\alpha 2}, \pi_{\beta 2}, \pi_{\gamma 2}$. The logic of their states is described by expressions (10).

We modify the predicate formulas for calculating the states of the PhP $\pi_{\gamma 1}$, adding to it the influence of the EF's coming from the PhP $\pi_{\gamma 1}$ and $\pi_{\gamma 2}$:

$$p_{\gamma 1}^- = \overline{p_{\gamma 1}^+ \cdot p_{\gamma 2}^+}. \quad (13)$$

Then the condition for connecting aggregate of the PhP $\pi_{\gamma 1}$ will be determined by the predicate expression:

$$p_{\gamma 1} = \overline{p_{\gamma 1}^+ \cdot p_{\gamma 2}^+} \cdot \bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+. \quad (14)$$

After turning off the PhP $\pi_{\beta 2}$, $p_{\gamma 1}^+ = \text{"TRUE"}$, $p_{\gamma 2}^+ = \text{"TRUE"}$, therefore, according to (14), the block in the PhP $\pi_{\gamma 1}$ is turned off, and TLA A_1 goes into the state of waiting for the activating EF. The cycle of connecting CSU blocks is closed.

If we use the advance relation symbol $\prec$, then the algorithm for asynchronous switching of aggregate states can be written as an expression:

$$\begin{aligned} s_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} &\prec \bar{s}_{\alpha 1}, s_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \\ &\prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \\ &\prec s_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, s_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec s_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, s_{\gamma 2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Thus, a cyclic hardware algorithm for serial connection of TLA A_1 and TLA A_2 aggregates was created (Fig. 7).

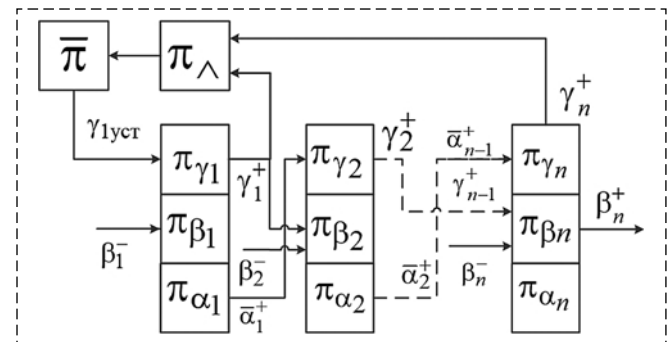


Fig. 7. TLA cyclic compound scheme

Similarly, it is possible to create cyclic hardware algorithms that combine a large number of ATLs.

Consider a CSU consisting of n TLA's. TLA A_1 consists of PhP's $\pi_{\alpha 1}, \pi_{\beta 1}, \pi_{\gamma 1}$, TLA A_i from PhP's $\pi_{\alpha i}, \pi_{\beta i}, \pi_{\gamma i}$, TLA A_n from PhP $\pi_{\alpha n}, \pi_{\beta n}, \pi_{\gamma n}$. Let us direct the EF γ_n^+ to the input of the PhP $\pi_{\gamma 1}$. Let's represent the logic of network state switching in the form of predicate formulas:

$$\begin{aligned} p_{\alpha 1} &= (\bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 1}^+ + p_{\alpha 1}^+) \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+ \\ p_{\beta 1} &= (\bar{p}_{\beta 1}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma 1}^+ + p_{\beta 1}^+) \cdot p_{\beta 1}^- \\ p_{\gamma 1} &= p_{\gamma 1}^+ \cdot p_{\gamma n}^+ \cdot \bar{p}_{\alpha 1}^+ \cdot \bar{p}_{\beta 1}^+ \\ &\dots\dots\dots (16) \\ p_{\alpha n} &= (\bar{p}_{\alpha n}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma n}^+ + p_{\alpha n}^+) \cdot \bar{p}_{\beta n}^+ \\ p_{\beta n} &= (\bar{p}_{\beta n}^+ \cdot \bar{p}_{\gamma n}^+ + p_{\beta n}^+) \cdot p_{\gamma n}^+ \cdot p_{\beta n}^- \\ p_{\gamma n} &= \bar{p}_{\alpha n}^+ \cdot \bar{p}_{\beta n}^+ \cdot \bar{p}_{\alpha_{n-1}}^+ \cdot \end{aligned}$$

A closed CSU performs a cyclical algorithm for sequential switching of aggregates. Activating threads β_i^- control the process of asynchronous switching of the TLA.

Conclusion

Unification of hardware solutions for automatic control of technical systems has been carried out. In the considered models, ternary logic receives a specific physical content for processing the states of a technical system according to the signs of sequential execution of processes. A generalized model of combining aggregates for hardware control of branching and cyclic processes in technical systems has been developed. The presented models of functional-logical combination of aggregates into serial chains allow to systematize the development of hardware algorithms for embedded control systems for technical and technological objects. The developed technical solutions create the ability to control objects using unified logic circuits integrated into the aggregates, which do not require analog-to-digital conversion of sensor signals and programmable control devices. As a result, the speed of command synthesis is sig-

nificantly increased, and the energy and weight and size parameters of the control system are reduced. The declared properties of analog automata open up prospects for their application in microelectromechanical and microelectronic systems.

References

1. **Shibu K. V.** Introduction to Embedded Systems. Tata McGraw-Hill Education, 2009, 402 p.
2. **Syzdykov E. K., Gainutdinova A. V., Krikun K. G.** Development of control system algorithms for mini unmanned aerial vehicle of combined scheme-convertiplane, *Russian Aeronautics*, 2012, vol. 55, no. 2, pp. 199–202 (in Russian).
3. **Michael Barr M., Massa A. J.** Introduction. Programming embedded systems: with C and GNU development tools, O'Reilly Media, Inc., 2006, 336 p.
4. **Oluwale O.** Oyetoke Embedded Systems Engineering, the Future of Our Technology World; A Look Into the Design of Optimized Energy Metering Devices, *International Journal of Recent Engineering Science (IJRES)*, December 2015 vol. 18, pp. 17–25.
5. **Catsoulis J.** Designing Embedded Hardware, Released May 2005, O'Reilly Media, Inc., 398 p.
6. **Polikarpova N. I., Shalyto A. A.** Automatic programming, St. Petersburg, 2008, 167 p. (in Russian).
7. **Pandiankal Abhilash V.** A Key to Program Microcontroller System, S Chand & Co Ltd, 2012, 332 p.
8. **Pal A.** Microcontrollers: Principles and Applications, PHI Learning Pvt. Ltd., 2012, 374 p.
9. **Baek S., Bermudez F. G., Fearing R.** Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter, *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE, 2011, pp. 2674–2681.
10. **Vijay K., Nathan M.** Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles, *The International Journal of Robotics Research*, 2012, vol. 31, no. 11, pp. 1279–1291.
11. **Duhamel P.-E. J., Perez-Arancibia N. O., Barrows G. L., Wood R. J.** Biologically inspired optical-flow sensing for altitude control of flapping-wing microrobots, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2013, vol. 18, no. 2, pp. 556–568.
12. **De Wagter C., Tijmons S., Remes B. D., de Croon G.** Autonomous flight of a 20-gram flapping wing mav with a 4-gram onboard stereo vision system, *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, IEEE, 2014, pp. 4982–4987.
13. **Helbling E. F., Fuller S. B., Wood R. J.** Pitch and yaw control of a robotic insect using an onboard magnetometer, *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, IEEE, pp. 5516–5522.
14. **Harel D., Pnueli A.** On the development of reactive systems / In "Logic and Models of Concurrent Systems", NATO Advanced Study Institute on Logic and Models for Verification and Specification of Concurrent Systems, Springer Verlag, 1985, pp. 477–498.
15. **Vasyukevich V. O.** Elements of asynchronous logic. Venjunction and sequence, 2009, 123p., available at: <http://asynlog.balticom.lv/Content/Files>

А. Ахмад, аспирант, aws.ahmad318@gmail.com, **А. С. Ющенко**, д-р техн. наук, проф., yusch@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет)

Метод управления подводным роботом с волнообразным движителем с использованием активного подавления помех и нечеткой логики

Статья посвящена разработке и анализу алгоритмов управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) с волнообразным движителем. Проводится анализ и краткий обзор работ, в которых рассматриваются динамическая и кинематическая модели подводного робота с волнообразным плавником. Представлена модель робота во взаимодействии с окружающей средой в библиотеке Simscape-MATLAB. Для решения задачи управления движением подводного робота с волнообразным движителем по курсу и по глубине предлагается применить метод активного управления подавлением помех ADRC (Active Disturbance Rejection Control). Это метод управления, основанный на расширении модели системы путем введения дополнительной переменной состояния, представляющей все, что не включается в математическое описание самой системы. Виртуальное состояние объекта управления оценивается в режиме онлайн с помощью наблюдателя состояния и используется при формировании управляющего сигнала, чтобы учесть фактическое возмущение, действующее на систему. Преимущества предлагаемого метода заключаются в том, что он не требует точного аналитического описания динамики АНПА, в частности, аналитического описания связи между управляемыми параметрами движения плавника и соответствующим движением робота. Для решения этой задачи применяются методы нечеткой логики, основанные на законах физики и гидродинамики. Приводятся результаты моделирования движения АНПА при управлении по курсу и по глубине при наличии быстропеременных внешних возмущений с применением полной нелинейной динамической модели с шестью степенями свободы. Проведенные исследования подтверждают работоспособность разработанной модели и предложенного способа управления.

Ключевые слова: волнообразное движение, плавник, гидродинамика, метод ADRC, нечеткая логика, внешние возмущения

Введение

Сегодня существенно расширилась область применения робототехники, которая в настоящее время включает промышленность, сельское хозяйство, медицину, военную сферу. В связи с этим возросла важность исследований и разработок в области управления и проектирования роботов различного типа, в том числе летающих, наземных и подводных роботов (АНПА) [1–6].

В последние годы особое внимание обращено на морскую среду, в том числе арктического континента, будь то использование ее ресурсов или проведение поисково-спасательных операций. Начались работы по разработке роботов, способных работать в различных условиях и использующих новые способы передвижения, заимствованные у живых организмов, обитающих в этой среде [5–9].

Один из принципов движения, исследуемых в последнее время, — это принцип перемещения за счет волнообразного движения плавников, свойственного скатам и некоторым другим подводным существам [6–9]. Этот способ движения позволяет обеспечить значительную маневренность, а также стабилизацию при наличии течения. Кроме того, такой способ по-

зволяет перемещаться не только в воде, но и по дну моря, а также "выползти" на берег и перемещаться в пределах береговой зоны. Все эти особенности позволяют существенно расширить круг задач, выполняемых подводными роботами как при дистанционном управлении, так и в автономном плавании. Отметим относительную бесшумность их работы, что также является преимуществом при решении ряда задач. Вышеупомянутые преимущества показывают важность разработки и проектирования автономной системы управления этого типа роботов, для того чтобы они могли автономно выполнять свои задачи в труднодоступных или опасных зонах.

В данной статье рассматриваются два аспекта, связанные с построением системы автономного управления подводным роботом с волнообразным плавником. Первый заключается в том, чтобы обеспечить достаточно точное управление роботом по курсу и по глубине на основе технологии Active Disturbance Rejection Control (ADRC). Второй аспект состоит в использовании нечеткой логики для определения взаимосвязи между силами, генерируемыми плавниками, и параметрами распространяющейся волны, что необходимо для организации управления движением робота.

Модель волнообразного движения

У каждого вида живых существ есть свой уникальный способ перемещения, который адаптирован к среде. Скаты используют принцип волнообразного движения [9–11]. Этот принцип состоит в том, что плавник совершает волнообразное движение, при котором волна движется по направлению от передней кромки плавника к задней кромке или в обратном направлении, создавая гидродинамическую силу, обеспечивающую движение вперед или назад соответственно. Параметры волнообразного движения зависят от соотношения параметров колебательного движения плавника, включая амплитуду, частоту и длину волны [12].

Упрощенная (дискретная) кинематическая схема гибкого плавника показана на рис. 1. Базовая плоскость, относительно которой происходят колебания ребер плавника, отмечена штриховыми линиями. Волнообразное движение i -го плавника можно определить как его колебание относительно базовой плоскости:

$$\begin{aligned}\theta_i(i, t) &= \Delta\theta_i + \theta_B = \\ &= \theta_{i\max}(x_i) \sin(2\pi t f \pm \phi_i) + \theta_B,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\phi_i = 2\pi \frac{(i-1)L}{(n-1)\lambda} = 2\pi(i-1)\frac{\Delta L}{\lambda} = (i-1)\Delta P$.

Здесь t — время; $\theta_{i\max}$ — амплитуда колебаний i -го ребра относительно базовой плоскости; f — частота колебаний; λ — длина волны; θ_B — угол отклонения базовой плоскости от плоскости XZ на рис. 1; ϕ_i — фаза колебаний i -го ребра; ΔP — фазовый сдвиг между двумя

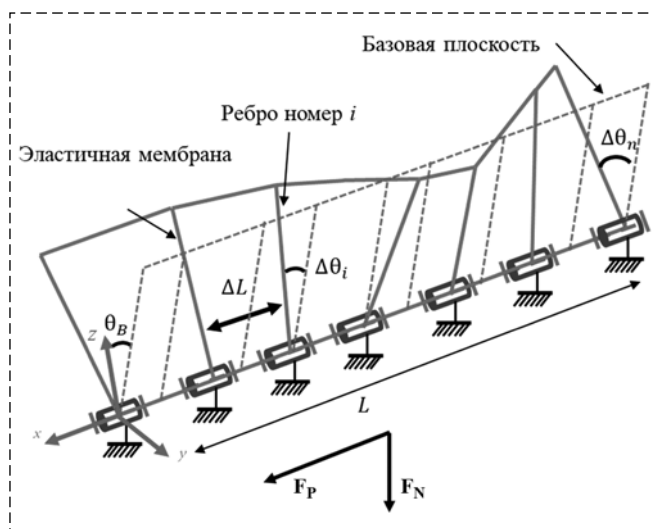


Рис. 1. Дискретная кинематическая схема плавника
Fig. 1. Discrete kinematic scheme of the fin

соседними ребрами, который не должен быть больше $\pi/2$ ($\Delta P \leq \pi/2$). Знак "±" перед сдвигом по фазе в уравнении (1) определяет направление распространения волны по плавнику. Знак "плюс" указывает на то, что генерируемая волна идет от положительного направления к отрицательному направлению по оси X , а генерируемая осевая сила F_P имеет противоположное направление. Знак "минус" означает, что волна идет в противоположную сторону. В обоих случаях генерируемая сила F_N всегда находится в базовой плоскости и направлена вниз, перпендикулярно силе F_P .

Модель подводного робота

Модель динамики подводного робота должна описывать движение робота с шестью степенями свободы с учетом действия гидростатических сил, гравитации и плавучести, а также гидродинамических сил, сопротивления воды и подъемной силы, создаваемой корпусом робота, движущегося в воде. Необходимо также учесть дополнительные эффекты, вызванные ускорением воды, вытесненной подводным аппаратом, возмущающими силами от подводных течений и силами тяги от плавников.

Модель робота должна соответствовать принятой в гидромеханике инерциальной системе координат $O_E X_E Y_E Z_E$ (NED-North-East-Down), которую мы совместим с собственной системой координат робота $O_b X_b Y_b Z_b$ с центром в центре масс робота, оси которой совпадают с главными осями конструкции робота и со-

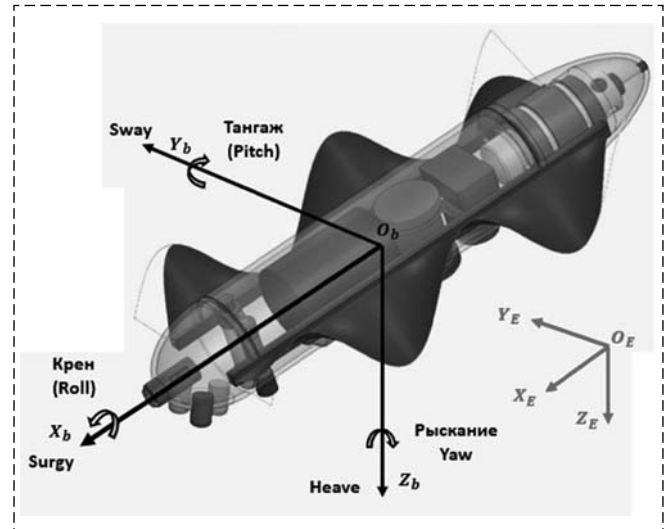


Рис. 2. Системы координат робота
Fig. 2. The coordinate systems of the robot

Таблица 1
Table 1

Обозначение SNAME для морских аппаратов [13]

Common notation SNAME for marine vehicle's motion [13]

Описание маневра	Обозначение	Силы	v_1	η_1
Движение в направлении X	Surge	X	u	x
Движение в направлении Y	Sway	Y	v	y
Движение в направлении Z	Heave	Z	w	z
Описание маневра	Обозначение	Моменты	v_2	η_2
Вращение вокруг оси X	Roll	K	p	φ
Вращение вокруг оси Y	Pitch	M	q	θ
Вращение вокруг оси Z	Yaw	N	r	ψ

ответствуют углам тангажа, крена и рысканья (surge, sway, heave) (рис. 2). Мы будем использовать также международные обозначения, принятые для морских аппаратов SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers), введенные в табл. 1 [13].

Кинематическая модель

В инерциальной системе отсчета $O_E X_E Y_E Z_E$ обозначим $\eta_1 = [x, y, z]^T$ — вектор координат центра масс робота, $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$ — вектор координат углов Эйлера, которые описывают положение и ориентацию робота согласно табл. 1. Векторы линейной и угловой скоростей в системе координат робота $O_b X_b Y_b Z_b$ равны соответственно $v_1 = [u, v, w]^T$ и $v_2 = [p, q, r]^T$.

Кинематическая модель робота может быть записана следующим образом [14]:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}_e(\mathbf{R}_I^B) \dot{\eta}; \quad (2)$$

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}_e^{-1}(\mathbf{R}_B^I) \mathbf{v}; \quad (3)$$

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{J}_e(\mathbf{R}_I^B)$ — матрица поворота из инерциальной системы координат в систему координат робота; $\mathbf{J}_e^{-1}(\mathbf{R}_B^I)$ — матрица поворота из системы координат робота в инерциальную систему координат. Эти матрицы можно записать следующим образом:

$$\mathbf{J}_e(\mathbf{R}_I^B) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B^I & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}(\eta_2) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_e^{-1}(\mathbf{R}_B^I) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_B^I & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}^{-1}(\eta_2) \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{J}(\eta_2)$ — матрица Якоби; $\mathbf{R}_B^I$ — матрица вращения, выражающая преобразование из инерциальной системы отсчета в собственную систему координат робота:

$$\mathbf{J}(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\theta & c\theta c\phi \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\mathbf{J}^{-1}(\eta_2) = \frac{1}{c\theta} \begin{bmatrix} 1 & s\phi s\theta & c\phi s\theta \\ 0 & c\phi c\theta & -c\theta s\phi \\ 0 & -s\theta & c\phi \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_I^B = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & s\phi c\theta \\ s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_B^I = (\mathbf{R}_I^B)^{-1} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta s\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix}.$$

Здесь обозначено: $c\phi = \cos\phi$, $s\phi = \sin\phi$, $c\psi = \cos\psi$, $s\psi = \sin\psi$. Отметим, что матрица Якоби $\mathbf{J}(\eta_2)$ вырождена при $\theta = \frac{(2l+1)\pi}{2}$.

Динамическая модель

Как видно из рис. 2, конструкция робота обладает симметрией относительно продольной и поперечной осей. Для упрощения модели мы сделаем следующие предположения:

- движение по крену не учитывается ввиду значительного расстояния между центром тяжести и центром плавучести и относительно большой площади контакта робота с водой в вертикальном направлении;
- можно пренебречь связью между движением по глубине и по курсу;
- демпфирование можно приближенно считать линейным, т. е. эффектом нелинейного демпфирования можно пренебречь.

С учетом этих предположений основное уравнение динамики подводного аппарата может быть упрощено и записано следующим образом [17]:

$$\mathbf{M}_v \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_v(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_E, \quad (8)$$

где $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_\omega, 0, \tau_q, \tau_r]^T$ — вектор управления; τ_u, τ_ω — силы, развиваемые волной в направлении движения (surge) и подъема (heave), т. е. силы, за счет которых происходит управление роботом; τ_q, τ_r — моменты тангажа и рыскания в связанной с роботом системе координат $O_b X_b Y_b Z_b$; $\boldsymbol{\tau}_E = [\tau_{uE}, \tau_{vE}, \tau_{\omega E}, 0, 0, \tau_{rE}]^T$ — вектор внешних возмущений, $\tau_{uE}, \tau_{vE}, \tau_{\omega E}$ — возмущения, вызванные покачиванием и подъемом аппарата, τ_{rE} — момент возмущения, возникающий при рыскании аппарата.

Матрица $\mathbf{M}_v = \mathbf{M}_A + \mathbf{M}_{RB}$ включает матрицу присоединенной массы $\mathbf{M}_A$ и матрицу инерции $\mathbf{M}_{RB}$ исследуемого робота [14]:

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{26} \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Присоединенная масса создает дополнительный вклад за счет кориолисова и центробежного ускорений. Можно показать, что матричное выражение для суммарного эффекта от кориолисова ускорения имеет вид [14]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_v &= \mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -m_{33}\omega & -m_{22}v \\ 0 & 0 & 0 & -m_{33}\omega & 0 & m_{11}u \\ 0 & 0 & 0 & m_{22}v & -m_{11}u & 0 \\ 0 & -m_{33}\omega & -m_{22}v & 0 & m_{66}r & -m_{55}q \\ m_{33}\omega & 0 & m_{11}u & -m_{66}r & 0 & 0 \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 & m_{55}q & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\mathbf{C}_{RB}$ — матрица, описывающая эффект Кориолиса, обусловленный движением твердого тела; $\mathbf{C}_A$ — матрица, описывающая эффект Кориолиса, вызванный добавленной массой.

Матрица демпфирования $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ в уравнении (8) в общем случае определяется как

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D} + \mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|) > 0 \forall \mathbf{v}, \quad (11)$$

где $\mathbf{D}$ — матрица линейного демпфирования; $\mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|)$ — матрица квадратичного демпфирования. Если скорости робота достаточно высоки, то слагаемым $\mathbf{D}$ можно пренебречь. В противном случае можно, наоборот, пренебречь слагаемым $\mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|)$. В нашем случае скорость робо-

та считается малой, и мы пренебрегаем слагаемым $\mathbf{D}_n(|\mathbf{v}|)$. Таким образом, в нашем случае $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ — это матрица демпфирования, включающая все силы дрейфа F_{drag} и подъемной силы F_{lift} . Коэффициенты этой матрицы считаются постоянными. Для полностью погруженного тела можно представить эту матрицу в виде [14]

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -diag(X_u, Y_v, Z_\omega, 0, M_q, N_r) - diag(X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{\omega|\omega}|\omega|, 0, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|), \quad (12)$$

где $X_u, Y_v, Z_\omega, M_q, N_r$ — компоненты линейного гидродинамического демпфирования; $X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{\omega|\omega}|\omega|, 0, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|$ — компоненты квадратичного гидродинамического демпфирования.

В формуле (8) $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ — гидростатические эффекты, которые включают в себя совместное действие гравитации и плавучести в инерциальной системе координат. В системе координат $O_b X_b Y_b Z_b$ можно записать:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -(W - B)c\theta s\phi \\ -z_B B c\theta s\phi \\ -z_B B s\theta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где $W = mg$ — сила тяжести, которая действует на центр масс робота, который совпадает с началом системы координат робота $O_b X_b Y_b Z_b$, т. е. $[x_G, y_G, z_G]^T = [0, 0, 0]^T$; $B = -\rho W_0 g$ — архимедова сила, действующая на центр плавучести COB с координатами в системе координат робота, $[x_B, y_B, z_B]^T = [0, 0, z_B]^T$; W_0 — объем робота; ρ — плотность среды.

Стратегия и модель управления

Управление подводным роботом рассматриваемого типа должно быть обеспечено относительно глубины погружения и по углу рыскания ψ . Это должно быть достигнуто за счет параметров волны, образуемой плавниками. В свою очередь, параметры волны зависят от параметров движения плавника, которыми и достигается управление движением робота. К последним относятся F_L, F_R — частоты движения левого и правого плавников, соответственно, которые определяют силу воздействия плавников на внешнюю среду. Знак частоты в формуле

(1), как отмечено выше, является условным и зависит от направления их движения, т. е. определяет направление создаваемой силы по оси X : если частота имеет знак "+", то сила направлена назад, если знак "-", то сила направлена вперед. Основным параметром волны является ее максимальная амплитуда $\theta_{\max}$.

Создать гидродинамическую модель, связывающую движение робота с амплитудой волны, довольно сложно, тем более, что во время движения робота под водой система подвержена колебаниям и даже неустойчивости по ряду причин, включая нелинейные и изменяющиеся во времени характеристики турбулентности внешнего потока воды. В связи с этим для разработки контроллера был применен метод нечеткой логики, позволяющий связать управляемые параметры движения с желаемым результатом на основании физических законов.

Вторая проблема, возникающая при проектировании управления АНПА, заключается в том, что во время движения робота под водой система подвержена колебаниям за счет изменяющихся во времени характеристик турбулентности внешнего потока воды. В определенной мере устойчивость к внешним возмущениям может быть обеспечена в системе с обратной связью обычным ПИД регулятором. Однако представляется более эффективным в данном случае использовать для этой цели контроллер с активным подавлением помех ADRC (Active Disturbance Rejection Controller). Схема системы управления с нечетким контроллером приведена на рис. 3. Это система с обратной связью по заданным параметрам движения. Она содержит два последовательно соединенных контроллера. В первом вычисляется ошибка между заданными и реальными, измеренными параметрами движения, т. е. углом рыскания ψ , ли-

нейной скоростью в системе координат робота u , а также глубиной робота z . Для обеспечения устойчивости и качества процесса управления в целом здесь используется ADRC-контроллер, позволяющий также уменьшить влияние внешних возмущений [16, 17]. Во втором контроллере, вырабатывающем управляющие сигналы, используется метод нечеткой логики вместо аналитического описания гидродинамики робота.

Заметим, что настройка первого контроллера уже не может быть выполнена традиционным способом и требует предварительного моделирования полученной системы вместе со вторым контроллером (нечетким), который должен быть настроен предварительно исходя из законов гидродинамики.

Нечеткий контроллер

Нечеткий контроллер включает в себя три основных блока: фаззификации (приведения к нечеткости) входных переменных, нечеткой логики, обеспечивающий решение задачи, и дефаззификации, т. е. приведения к четкости полученного решения.

В первом блоке формируются значения новых лингвистических переменных, соответствующие как входным, так и выходным переменным нечеткого контроллера. К входным мы выше отнесли $(\tau_u, \tau_\omega, \tau_r)$, а к выходным — $(\theta_{\max}, \theta_B, F_L, F_R, \phi)$, а соответствующие им лингвистические переменные обозначим (T_u, T_ω, T_r) и $(P_{\theta_{\max}}, P_{\theta_B}, P_\phi, P_{F_L}, P_{F_R})$. Нечеткие значения выбранных лингвистических переменных приведены в табл. 2.

Заметим, что нечеткий контроллер представляет собой параллельно работающие контроллеры по каждому из требуемых выходов,

т. е. по максимальной амплитуде $\theta_{\max}$, по частоте F_L, F_R , по углу отклонения θ_B и по фазовому сдвигу ϕ . Эти значения определяются с помощью функций принадлежности, выбранных на основании естественных соотношений. Предполагается, что для каждого из нечетких значений в табл. 2 выбрана треугольная функция принадлежности. Они задаются в пределах определенных ограничений, которые здесь заданы в условных единицах (табл. 2).

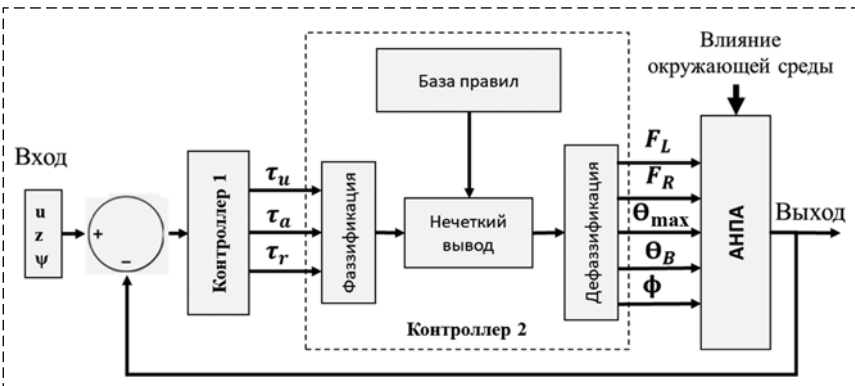


Рис. 3. Схема системы управления
Fig. 3. Control system diagram

Лингвистические переменные и диапазоны их треугольных функций принадлежности
Linguistic variables and ranges of their triangular membership functions

Лингвистические переменные	Функции принадлежности							
	Negative big	Negative medium	Negative small	Zero	Positive small	Positive medium	Positive big	Positive large
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PL
T_u, T_ω, T_r	-10, -10, -7	-10, -4, -1.5	-4, -1.5, 0	-1.5, 0, 1.5	0, 1.5, 4	1.5, 4, 10	7, 10, 10	—
P_{FL}, P_{FR}	-4, -4, -2.7	-4, -2.7, -1	-2.7, -1, 0	-1, 0, 1	0, 1, 2.7	1, 2.7, 4	2.7, 4, 4	—
$P_{\theta B}$	-90, -90, -60	-90, -60, -30	-60, 30, 0	-30, 0, 30	0, 30, 60	30, 60, 90	60, 90, 90	—
$P_{\theta max}$				0, 0, 10	0, 10, 20	10, 20, 30	20, 30, 30	—
P_ϕ				0, 0, 30	0, 30, 60	30, 60, 90	60, 90, 90	—

В основу выбора продукционных правил, содержащихся в базе правил (рис. 3) положены естественные соотношения, которые следуют из законов физики, а именно:

1. Углы отклонения обоих плавников θ_B всегда должны быть одинаковыми и иметь знак, противоположный знаку силы подъема τ_ω .

2. Значение подъемной силы τ_ω увеличивается с увеличением угла отклонения θ_B , и наоборот.

3. Значение подъемной силы τ_ω увеличивается с увеличением частоты плавников F_L, F_R , и наоборот.

4. Приоритет управления по курсу выше приоритета управления по линейной скорости u .

5. Когда момент рыскания τ_r и сила τ_u по оси X достаточно велики, предпочтительно обеспечивается большой момент рыскания.

6. Когда требуемый момент τ_r мал, а линейная скорость u — большая, направление волн вдоль двух плавников должно быть одинаковым, следовательно, условный знак частоты (F_L, F_R) должен быть одинаковым, хотя их значения могут быть разными.

Теперь для каждого контроллера можно записать систему продукционных правил. Ниже приводится система продукционных правил для управления по глубине. На вход соответствующего контроллера подается требуемое значение подъемной силы $\tau_\omega \in [-10, 10]$, а на выходе получаются нечеткие значения частоты $F_L, F_R \in [-4, 4]$ и угла отклонения плавников $\theta_B \in [-90, 90]$. Можно записать эти правила следующим образом:

1. Если (τ_ω есть NB), тогда (FR есть NB), (FL есть NB), (θ_B есть PB).

2. Если (τ_ω есть NM), тогда (FR есть NM), (FL есть NM), (θ_B есть PB).

3. Если (τ_ω есть NS), тогда (FR есть NM), (FL есть NM), (θ_B есть PS).

4. Если (τ_ω есть Z), тогда (FR есть Z), (FL есть Z), (θ_B есть ZZ).

Таблица 3
Table 3

Нечеткие правила для управления по курсу
Fuzzy rules for course control

T_u	T_r						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB, PB, PL, PB	NB, NS, PB, PB	NB, NM, PB, PB	NB, NB, PB, PB	NM, NB, PB, PB	NS, NB, PB, PB	PB, NB, PL, PB
NM	NB, PB, PB, PB	NB, NS, PB, PB	NM, NS, PB, PB	NM, NM, PB, PB	NS, NM, PB, PB	NS, NB, PB, PB	PB, NB, PB, PB
NS	NB, PB, PB, PB	NM, PM, PB, PB	NM, NS, PM, PM	NS, NS, PS, PS	NS, NM, PM, PM	PM, NM, PB, PB	PB, NB, PB, PB
Z	NB, PB, PB, PB	NM, PM, PM, PM	NS, PS, PS, PS	Z, Z, Z, Z	PS, NS, PS, PS	PM, NM, PM, PM	PB, NB, PB, PB
PS	NB, PB, PB, PB	NM, PM, PB, PB	PS, PM, PM, PM	PS, PS, PS, PS	PM, PS, PM, PM	PM, NM, PB, PB	PB, NB, PB, PB
PM	NB, PB, PB, PB	PS, PB, PB, PB	PS, PM, PB, PB	PM, PM, PB, PB	PM, PS, PB, PB	PB, PS, PB, PB	PB, NB, PB, PB
PB	NB, PB, PL, PB	PS, PB, PB, PB	PM, PB, PB, PB	PB, PB, PB, PB	PB, PM, PB, PB	PB, PS, PB, PB	PB, NB, PL, PB

5. Если (τ_ω есть PS), тогда (FR есть PM), (FL есть PM), (θ_B есть NS).

6. Если (τ_ω есть PM), тогда (FR есть PM), (FL есть PM), (θ_B есть NB).

7. Если (τ_ω есть PB), тогда (FR есть PB), (FL есть PB), (θ_B есть NB).

Аналогично можно задать систему правил для управления АНПА по курсу. В этом случае число правил значительно больше, поэтому их удобнее представить в виде таблицы (табл. 3), где указаны значения лингвистических переменных управления (P_{FL} , P_{FR} , $P_{\theta_{\max}}$, P_ϕ) для каждого значения T_r , T_u . На вход этого контроллера курса подается требуемое значение силы по оси x $\tau_u \in [-10, 10]$ и момент рыскания $\tau_r \in [-10, 10]$, а на выходе получают нечеткие значения частоты F_L , $F_R \in [-4, 4]$, максимальной амплитуды волны $\theta_{\max} \in [0, 30]$ и фазовый сдвиг между двумя соседними ребрами $\phi \in [0, 90]$.

Контроллер ADRC

Контроллер ADRC унаследовал принцип действия классического ПИД регулятора и практически не предъявляет требований к математической модели управляемого объекта. Этот метод управления основан на расширении модели системы с использованием дополнительной переменной состояния, учитывающей все то, что пользователь не включает в математическое описание объекта. Структура ADRC контроллера при управлении по глубине показана на рис. 4. Он состоит из четырех основных блоков:

1. Блок вычисления производных по времени входных переменных (TD, the tracking differentiator). Благодаря использованию TD опорный сигнал сглаживается, и генерируются

сигналы для отслеживания опорного сигнала и его производной.

2. Блок нелинейного преобразования ошибки состояния объекта (NLSEF, nonlinear state error feedback)[17].

3. Наблюдатель расширенного состояния (ESO, the extended state observer).

4. Схемы подавления помех (DRS, the disturbance rejection scheme).

Организация процесса управления заключается в отслеживании производных входных переменных, чтобы избежать резких изменений переменных и обеспечить их управление в реальном масштабе времени.

Контроль глубины на основе ADRC

Рассмотрим более подробно математическую модель управления АНПА по глубине на основе ADRC (рис. 4). С использованием математической модели робота (8)–(13) динамическое уравнение подъема для управления глубиной может быть записано как

$$m_{v33}\dot{\omega} - (Z_\omega + Z_{|\omega|}|\omega|)\omega - (W - B)c\theta s\phi = \tau_\omega + \tau_{\omega E}. \quad (14)$$

Путем преобразования матрицы (3) с учетом $\phi = \theta = 0$ и равенства (14) линейное ускорение робота $\ddot{z}$ в инерциальной системе координат можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= \dot{\omega} = G_\omega(\omega, t, d_\omega) + b_\omega \tau_\omega; \\ G_\omega(\omega, d_\omega, t) &= \\ &= \frac{[(Z_\omega + Z_{|\omega|}|\omega|)\omega + (W - B)c\theta s\phi]}{m_{v33}} + d_\omega; \quad (15) \\ b_\omega &= 1/m_{v33}; \\ d_\omega &= \tau_{\omega E}/m_{v33}, \end{aligned}$$

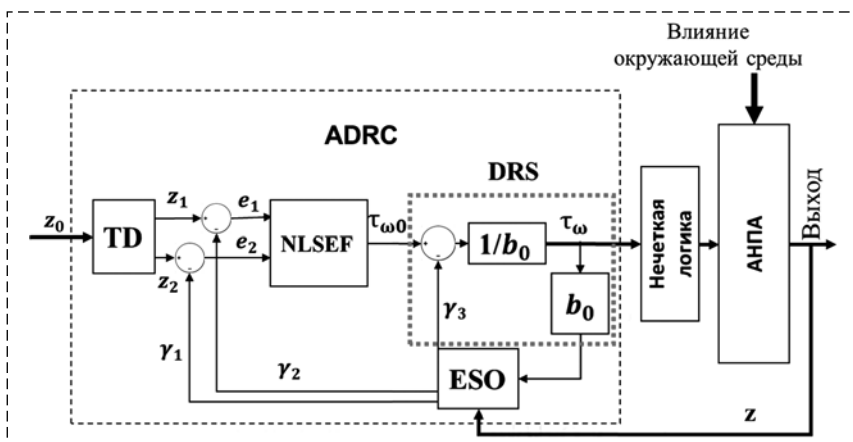


Рис. 4. Структура ADRC для управления по глубине [16, 17]

Fig. 4. ADRC structure for depth control [16, 17]

где d_ω — внешнее возмущение; $G_\omega(\omega, t, d_\omega)$ — обобщенное возмущение, включающее как внешнее возмущение, так и внутреннюю динамику. Рассмотрим математическое описание блока ADRC в дискретном варианте в соответствии с работой [16].

Для установленного значения z_0 блок TD в дискретные моменты времени отслеживает заданное значение и выдает сигналы $z_1(k)$, $z_2(k)$ в соответствии с уравнениями

$$\begin{aligned} z_1(k+1) &= z_1(k) + h z_2(k); \\ z_2(k+1) &= z_2(k) + \\ &+ h fhan(z_1(k) - z_0(k), z_2(k), \delta, h_0), \end{aligned} \quad (16)$$

где z_1 — дискретный сигнал отслеживания заданного значения z_0 ; z_2 — дискретные значения оценки производной сигнала z_1 ; h — шаг выборки; δ — коэффициент, определяющий скорость изменения z_1 ; коэффициент фильтрации h_0 определяет уровень подавления шума, функция $fhan(z_1, z_0, z_2, \delta, h_0)$ вычисляется как

$$fhan = -\delta \left[\frac{a}{d} - \operatorname{sgn}(a) \right] s_a - \delta \operatorname{sgn}(a),$$

где обозначено

$$\begin{aligned} d &= h_0 \delta^2; a_0 = h_0 z_2; y = z_1 + a_0; \\ a_1 &= \sqrt{d(d + 8|y|)}; \\ a_2 &= a_0 + \operatorname{sgn}(y)(a_1 - d)/2; \\ s_y &= [\operatorname{sgn}(y + d) - \operatorname{sgn}(y - d)]/2; \\ a &= (a_0 + y - a_2)s_y + a_2; \\ s_a &= [\operatorname{sgn}(a + d) - \operatorname{sgn}(a - d)]/2. \end{aligned} \quad (17)$$

Формула (16) описывает блок ТД для контроллера глубины, причем δ и h_0 — это параметры настройки. Увеличение значений δ может ускорить переходной процесс за счет увеличения управляющего сигнала. Увеличение значений параметра h_0 усиливает эффект подавления шума. Предположим, что обобщенное возмущение $G(\omega, t, d_\omega)$ в формуле (15) дифференцируемо. Обозначим $\gamma_1 = z, \gamma_2 = \dot{z}, \gamma_3 = G(\omega, t, d_\omega), \gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3]^T$, тогда можно записать следующее уравнение в пространстве состояний в соответствии с (15) следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \mathbf{A}\gamma + \mathbf{B}\tau_\omega + \mathbf{E}g; \\ z &= \mathbf{C}\gamma; \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = [0, b_\omega, 0]^T; \\ \mathbf{E} &= [0, 0, 1]^T; \mathbf{C} = [1, 0, 0]; g = \dot{G}_\omega, \end{aligned} \quad (18)$$

где g — определяет скорость изменения обобщенного возмущения. На основании (18) наблюдатель расширенного состояния (ESO) может быть представлен уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\gamma}} &= \mathbf{A}\hat{\gamma} + \mathbf{B}\tau_\omega + \mathbf{L}(z - \hat{z}); \\ \hat{z} &= \mathbf{C}\hat{\gamma}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\hat{\gamma} = [\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_3]^T$ является оценкой состояний в (18), $\mathbf{L} = [l_1, l_2, l_3]^T$ — вектор усиления наблюдателя, который необходимо настроить. Чтобы сделать работу наблюдателя ESO устойчивой, вектор усиления наблюдателя должен быть выбран таким, чтобы все корни характеристического полинома линейной системы (19) $\lambda(s) = s^3 + l_1 s^2 + l_2 s + l_3$ находились в левой полуплоскости. Можно потребовать, чтобы все корни были равны $-\omega_0$, что эквивалентно

$$\lambda(s) = s^3 + l_1 s^2 + l_2 s + l_3 = (s + \omega_0)^2, \quad (20)$$

где ω_0 — единственный параметр настройки, который обозначает желаемую собственную частоту системы с замкнутым контуром. Из (20) следует, что в этом случае $l_1 = 3\omega_0, l_2 = 3\omega_0^2$ и $l_3 = \omega_0^3$.

Как только наблюдатель ESO будет настроен, состояния системы (19) будут отслеживать соответствующие состояния системы (18), т. е. $\gamma \approx \hat{\gamma}$, и ошибка по глубине определится как разность между $z_1(k)$ и его оценкой состояния на выходе наблюдателя. Аналогично определяется ошибка по производной:

$$\begin{aligned} e_1 &= z_1(k+1) - \gamma_1(k+1); \\ e_2 &= z_2(k+1) - \gamma_2(k+1). \end{aligned} \quad (21)$$

Теперь управляющий сигнал в уравнении (15) определяется по формуле

$$\tau_\omega = \frac{\tau_{\omega 0} - \hat{\gamma}_3}{b_\omega}, \quad (22)$$

где $\tau_{\omega 0}$ следует задавать как сигнал управления. Учитывая что $\hat{\gamma}_3 \approx G_\omega(\omega, t, d_\omega)$, мы можем переписать уравнение динамики (15) в виде

$$\ddot{z} = G_\omega(\omega, t, d_\omega) + \tau_{\omega 0} - \hat{\gamma}_3 \approx \tau_{\omega 0}. \quad (23)$$

Отметим, что (23) приближенно представляет собой двойной интегратор, которым легко управлять с помощью ПД регулятора и который задается выражением

$$\tau_{\omega 0} = k_{p\omega} e_1 + k_{d\omega} e_2, \quad (24)$$

где $k_{p\omega}$ и $k_{d\omega}$ — соответственно коэффициенты пропорциональности по ошибке и по ее производной.

Контроллер курса на основе ADRC

Управление роботом в горизонтальной плоскости обеспечивается путем управления по углу курса (углу рысканья) ψ и по линейной скорости u вдоль продольной оси робота. С использованием математической модели робота (8) соответствующие уравнения его движения могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} m_{v11}\dot{u} + (m_{v22} - m_{v11})\omega u - \\ - ((X_u + X_{u|u}|u|)u) = \tau_u + \tau_{uE}; \\ m_{v66}\dot{r} + (m_{v22} - m_{v11})\omega u - \\ - (N_r + N_{r|r}|r|)r = \tau_r + \tau_{rE}. \end{aligned} \quad (25)$$

Путем преобразования матрицы (3) с учетом $\phi = \theta = 0$ и равенства (25) угловое ускорение робота $\ddot{\psi}$ в инерциальной системе координат можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} = \dot{r} = G_r(r, d_r, t) + b_r \tau_r; \\ G_r(r, d_r, t) = (N_r + N_{r|r}|r|)r / m_{v66}; \\ b_r = 1 / m_{v66}; \\ d_r = [(m_{v11} - m_{v22})\omega u + \tau_{rE}] / m_{v66}, \end{aligned} \quad (26)$$

где d_r — внешнее возмущение; $G_r(\omega, t, d_r)$ — обобщенное возмущение, включающее внешнее возмущение и внутреннюю динамику. Поскольку динамическое уравнение курса и линейной скорости (26) аналогично (14), то контроллер курса робота можно реализовать на основе ADRC аналогично предыдущему [17].

Моделирование движения АНПА

Для проверки системы управления роботом и функционирования предлагаемых контроллеров курса и глубины было проведено

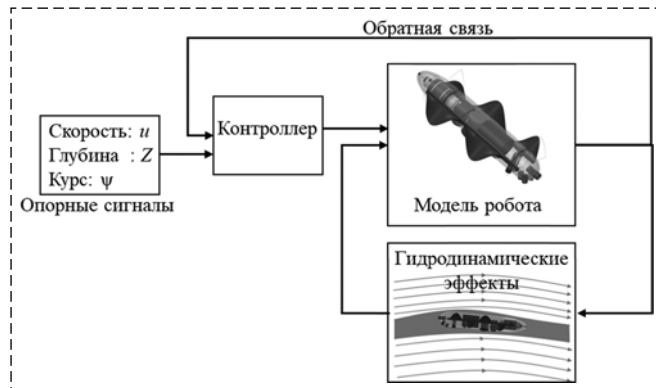


Рис. 5. Модель взаимодействия робота с окружающей средой
Fig. 5. The model of robot interaction with environment

моделирование исследуемого робота в среде MATLAB. Вначале была построена модель взаимодействия робота с окружающей средой в соответствии со схемой, показанной на рис. 5, при этом были использованы результаты гидродинамического моделирования, полученные нами ранее в работе [15]. Как и выше, здесь обозначено: $M_v = M_{RB} + M_A$, где M_A — матрица присоединенной массы; M_{RB} — матрица инерции; D — линейная матрица демпфирования; W — сила тяжести; B — архимедова сила исследуемого робота. В соответствии с данными работы [15] было принято:

$$M_v = \begin{bmatrix} 32,38 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 64,84 & 0 & 0 & 0 & -1,8412 \\ 0 & 0 & 64,84 & 0 & 1,8412 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,8412 & 0 & 7,83 & 0 \\ 0 & -1,8412 & 0 & 0 & 0 & 7,82 \end{bmatrix}; \quad (27)$$

$$D(v) = \text{diag}([1,57u + 0,5], [39,54\omega + 1,98], [62,3\omega + 5], 0, [3,93q - 0,33], [2,98r - 0,098]); \quad (28)$$

$$W = 290N; B = 288N. \quad (29)$$

Для моделирования предлагаемых контроллеров, включая ADRC [18], глубины и курса робота применялся блок FUZZY LOGIC TOOLBOX в пакете MATLAB. Управляющими сигналами контроллеров курса и глубины являются момент по углу рысканья τ_r , сила τ_u по оси X (см. рис. 3) и сила подъема τ_ω по оси Z . Управляющими параметрами робота являются частота колебаний, направление распространения волны, максимальная амплитуда колебаний, угол отклонения двух плавников θ_B и фазовый сдвиг (см. рис. 1). При моделировании были заданы ограничения: $F_L, F_R \in [-4,4 \text{ Гц}]$, $\theta_{\max} \in [0, 30^\circ]$, $\theta_B \in [-90, 90^\circ]$, $\phi \in [0, 90^\circ]$. Настройка блока ADRC возможна с использованием всего нескольких основных параметров, которые показаны в табл. 4 [18].

После подстройки параметров регуляторов по глубине и по курсу и выбора правил и функций принадлежности для нечеткого регулятора, рассмотренных выше, были получены результаты, показанные на рис. 6. Результаты показывают, что ADRC-контроллер для различных опорных сигналов управляет глубиной и курсом робота без перерегулирования и имеет время переходного процесса, меньшее 10 с.

Таблица 4
Table 4

Параметры настройки контроллера ADRC
ADRC controller settings

Параметр	Контроллер глубины (z)	Контроллер скорости (u)	Контроллер курса (ψ)
n	2	1	2
$\hat{b}$	1,3	0,08	1
ω_0	5	10	10
ω_c	1	2	1
$u_{\max}, u_{\min}$	10, -10	10, -10	10, -10
T_d	0,2	0,5	—

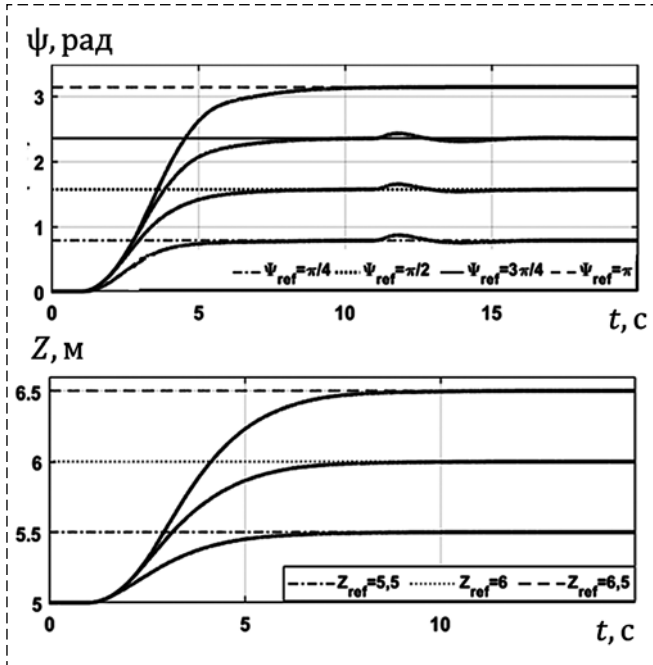


Рис. 6. Результаты моделирования ADRC при управлении по глубине и по курсу

Fig. 6. Simulated ADRC results in depth and course control

Для проверки помехозащищенности предлагаемого контроллера проводилось моделирование его работы при наличии быстро меняющихся периодических возмущений, определяемых по формуле

$$\tau_{iE} = A_i \sin(\omega_i t + \vartheta_i), \quad (30)$$

где A_i , ω_i , ϑ_i — амплитуда, частота и фаза возмущений, соответственно. В данной работе внешние возмущения τ_E определяются следующим образом:

$$\tau_{iE} = \begin{bmatrix} \tau_{uE} \\ \tau_{\psi E} \\ \tau_{\omega E} \\ \tau_{rE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,5 \sin(t) \\ \sin(t - \pi/3) \\ \sin(t) + 2 \\ 0,5 \sin(0,5t + \pi/6) \end{bmatrix}. \quad (31)$$

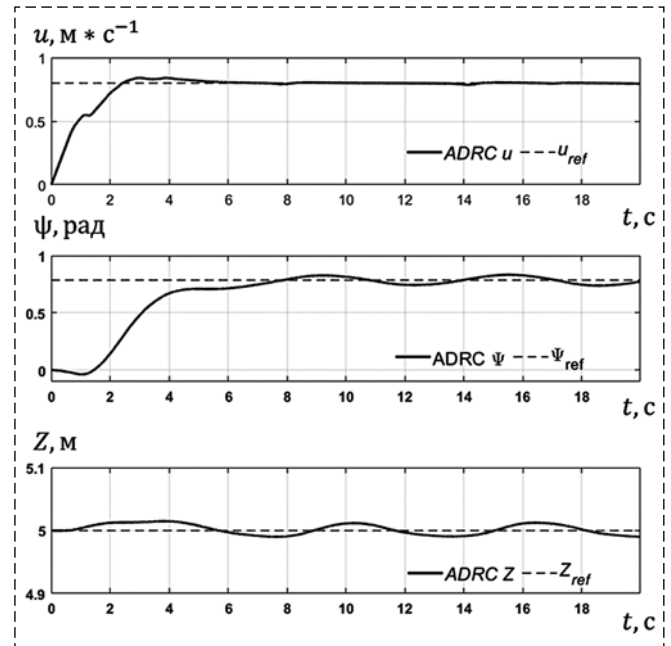


Рис. 7. Результаты моделирования ADRC контроллера при наличии возмущений.

Fig. 7. Simulated ADRC results in the presence of Fast-Varying periodic disturbances.

Результаты моделирования при наличии возмущений показаны на рис. 7, они показывают, что робот может эффективно следовать желаемым сигналам по курсу 0,8 рад, глубине 5 м, скорости 0,8 м/с при действии выбранных возмущений с высокой точностью. Результаты моделирования подтверждают способность контроллера оценивать внешние возмущения и вырабатывать управляющие сигналы (как показано на рис. 8), позволяющие компенсировать возмущения со стороны внешней среды.

Заключение

В данной работе для управления роботом с волнообразным плавником был предложен контроллер, включающий в себя контроллер с активным подавлением помех ADRC и контроллер, построенный на базе нечеткой логики. Основная задача контроллера ADRC состоит в том, обеспечивать устойчивость и качество процесса управления в целом, оценить и уменьшить влияние внешних и внутренних возмущений. Нечеткий контроллер использовался для преобразования управляющего сигнала, полученного от ADRC, в управляющий параметр волнообразного плавника. Предварительные результаты моделирования показали эффективность предлагаемого способа управления роботом с волнообразным плавником.

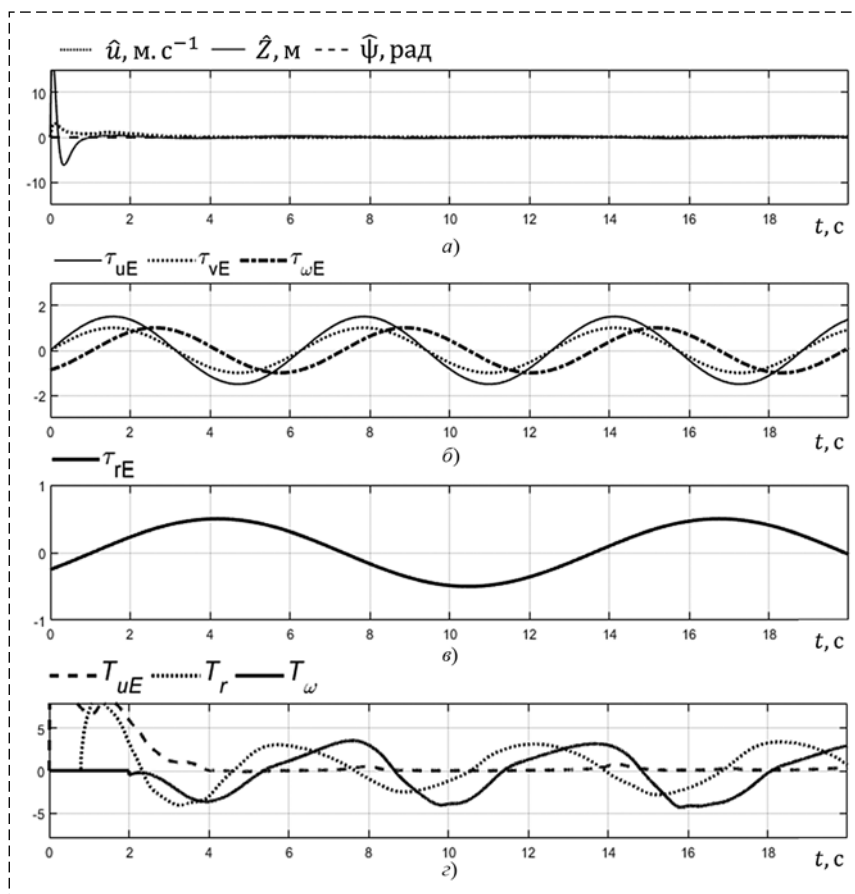


Рис. 8. Оцениваемые возмущения (а), внешние возмущения (б, в), управляющие сигналы (г)

Fig. 8. Estimated disturbances (a), external disturbances (б, в), control signal (г)

Отметим целый ряд допущений, которые были приняты при исследовании. Они касаются как модели динамики робота с гибкими плавниками, так и учета среды, в которой движется этот робот. В дальнейшем предполагается существенно уточнить эти вопросы. Тем не менее, полученные предварительные результаты позволяют сделать вывод о работоспособности системы управления АНПА данного типа. Дальнейшие исследования позволят обосновать возможность применения такого робота при выполнении реальных задач разведки и патрулирования, требующих маневрирования и следования по заранее заданной траектории.

Список литературы

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // InInternational Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2018 Sep 18. Springer, Cham. P. 270—279.
2. Марченко К. П., Коновалов К. В., Ершов С. Д., Ахмад А., Вассуф Я. Разработка математической модели кинематики и динамики колесного дифференциального

робота // Научный аспект. 2021. Vol. N. 03(01). P. 277—294.

3. Алексеев В. Л., Горячкин Д. А., Грязнов Н. А., Купренюк В. И., Соснов Е. Н. Перспективы использования строб-лидаров в автономных мобильных роботах // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. № 2 (9). С. 133—141.

4. Андреев В. П. Обеспечение безопасности работы кино- и тележурналистов средствами экстремальной робототехники // Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". 2022. С. 25—34.

5. Чернышев В. В., Арыканцев В. В., Калинин Я. В., Насари Задеган А. Х., Шаронов Н. Г. Отработка методов управления движением шагающих робототехнических систем передвигающихся по дну // Междуна. науч.-техн. Конф. "Экстремальная робототехника". 2022. С. 286—294.

6. Engineers, Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles. URL: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.

7. Pliant, Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot. URL: <https://www.pliantenergy.com/robotics>

8. URL: https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id_45231/

9. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus* // Mechanism and machine theory. 2009 Mar 1. Vol. 44, N. 3. P. 633—45.

10. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion // IEEE Journal of oceanic engineering. 1999 Apr. Vol. 24, N. 2. P. 237—52.

11. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012 Nov 26. Vol. 19, N. 1. P. 191—200.

12. Ахмад А., Вассуф Я., Коновалов К. В., Ющенко А. С. Исследование подводного робота с волнообразным движителем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 11. С. 607—616.

13. SNAME. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid // Technical and Research Bulletin. 1950. P. 1—5.

14. Antonelli G., Antonelli G. Underwater robots. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. Vol. 3. P. 23—48.

15. Ахмад А., Ющенко А. С. Динамическая модель подводного мобильного робота с волнообразными движителями // Труды 33-й Междуна. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". 2022.

16. Huang Y. et al. Active disturbance rejection control: Methodology, practice and analysis // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. IEEE, 2014. P. 1—5.

17. Han J. From PID to active disturbance rejection control // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. Vol. 56, N. 3. P. 900—906.

18. Lakomy K. et al. Active Disturbance Rejection Control (ADRC) Toolbox for MATLAB/Simulink // arXiv preprint arXiv:2112.01614. 2021.

Undulating Propulsion Underwater Robot Control Method Based on ADRC and Fuzzy Logic

A. Ahmad, aws.ahmad318@gmail.com, A. S. Yuschenko, yusch@bmstu.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Yuschenko Arkady S., Dr. of Sc., Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: arkadyus@mail.ru

Accepted on May 30, 2023

Abstract

The article is devoted to the development a closed-loop depth and course control algorithms for underwater robot with pair undulating fin. The controller was proposed based on the Active Disturbance Rejection Control (ADRC) technique and fuzzy logic. A brief review of the underwater robot with pair undulating fin (AUV) is carried out. The dynamic and kinematic robot model is given, and the robot model with the environment is presented in the Simscape-MATLAB library. To solve the problem of controlling course and depth of the robot, a method of Active Disturbance Rejection Control (ADRC) is proposed. This robust control method based on extension of the system model with an additional and fictitious state variable, representing everything that is not included in the mathematical description of the plant. This method allows to treat the considered system with a simpler model, since the negative effects of modeling uncertainty are compensated in real time. The advantage of the proposed method is that an exact analytical description of the system is not required, since it can be assumed that the unknown parts of the dynamics are internal noise in the installation. The fuzzy control method is used to build a non-linear relationship between controller outputs and fin parameters that determine the generated fin forces. The results of modeling of the problem of heading and depth control using a complete nonlinear dynamic model with six degrees of freedom are presented. The conducted studies confirm the operability, adequacy, and anti-disturbance ability of the ADRC controller.

Keywords: undulating propulsion, Active Disturbance Rejection Control (ADRC), fuzzy logic, course, depth control, external disturbance

For citation:

Ahmad A., Yuschenko A. S. Undulating Propulsion Underwater Robot Control Method Based on ADRC and Fuzzy Logic, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 469–480.

DOI: 10.17587/mau.24.469-480

References

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2018 Sep 18, Cham, Springer, pp. 270–279.
2. Marchenko K. P., Konovalov K. V., Ershov S. D., Ahmad A., Wassouf Y. Development of a mathematical model of kinematics and dynamics of a wheeled differential robot, *Scientific Aspect*, 2021, vol. 03, no. 01, pp. 277–294 (in Russian).
3. Alekseev V. L., Goryachkin D. A., Gryaznov N. A., Kuprenyuk V. I., Sosnov E. N. Prospects for the use of strobe lidars in autonomous mobile robots, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2021, vol. 2, no. 9, pp. 133–141 (in Russian).
4. Andreev V. P. Ensuring the safety of film and television journalists by means of extreme robotics, *International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2022, pp. 25–34 (in Russian).
5. Chernyshev V. V., Arykantsev V. V., Kalinin Y. V., Nasari Zadegan A. Kh., Sharonov N. G. development of methods for controlling the movement of walking robotic systems moving along the bottom, *International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2022, pp. 286–294 (in Russian).
6. Engineers, Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles, available at: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.
7. Pliant, Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot, available at <https://www.pliantenergy.com/robotics>
8. Available at: https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultra-sound-id_45231/
9. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*, *Mechanism and machine theory*, 2009 Mar 1, vol. 44, no. 3, pp. 633–45.
10. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999 Apr., vol. 24, no. 2, pp. 237–52.
11. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012 Nov. 26, vol. 19, no. 1, pp. 191–200.
12. Ahmad A., Wassouf Y., Konovalov K. V., Yushchenko A. S. Study of an underwater robot with a wave-like propulsion device, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 607–616 (in Russian).
13. SNAME. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *Technical and Research Bulletin*, 1950, pp. 1–5.
14. Antonelli G. Underwater robots, Switzerland, *Springer International Publishing*, 2014, vol. 3, pp. 23–48.
15. Ahmad A., Yushchenko A. S. Dynamic model of an underwater mobile robot with undulating propulsors, *Proceedings of the 33rd International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"*, 2022 (in Russian).
16. Huang Y. et al. Active disturbance rejection control: Methodology, practice and analysis, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, IEEE*, 2014, pp. 1–5.
17. Han J. From PID to active disturbance rejection control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009, vol. 56, no. 3, pp. 900–906.
18. Lakomy K. et al. Active Disturbance Rejection Control (ADRC) Toolbox for MATLAB/Simulink, *arXiv preprint arXiv:2112.01614*, 2021.

К. Д. Крестовников, мл. науч. сотр., k.krestovnikov@iias.spb.su,

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)

Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной системой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных роботов*

Возможность перераспределения энергетических ресурсов в группе наземных роботов позволяет увеличить площадь достижимого рабочего пространства и расширить функциональные возможности группы. Применение беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) для обмена энергетическими ресурсами между наземными роботами позволяет снизить требования к точности позиционирования и повысить надежность робототехнической системы. В данной работе рассматриваются алгоритмы мониторинга и управления двунаправленной БСПЭ при эксплуатации в составе наземного робота. Предложена структурная схема модуля двунаправленной БСПЭ для интеграции в систему управления робота, построенную по распределенным принципам. Разработанные алгоритмы учитывают специфику схемотехнических решений двунаправленной БСПЭ, реализованной с применением неуправляемого резонансного автогенератора. Апробация предложенных решений проведена на базе робототехнической платформы. В экспериментах рассматривается процесс пополнения энергетических ресурсов одного из роботов другим роботом. Энергия передается между роботами с одинаковыми Li-ion аккумуляторными батареями, имеющими номинальное напряжение 7,4 В и емкость 5 А·ч. Выполняется заряд батареи робота с уровня 50 % до уровня 90 % при различной точности позиционирования. При смещении 4 мм и расстоянии между приемной и передающей катушками 4 мм время заряда составило 48 мин, что на 5 % больше, чем при заряде проводным способом. Максимальное время заряда составило 57 мин при расстоянии между роботами 15 мм. Применение БСПЭ для энергетического обмена между наземными роботами или для заряда роботов на зарядной станции позволяет повысить автономность функционирования группы, так как даже при низкой точности позиционирования передача энергетических ресурсов выполняется успешно. Предлагаемые решения могут быть использованы для заряда батарей и реализации процессов перераспределения ресурсов в группах наземных и подводных роботов.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, групповое управление, алгоритмы управления, система управления робота, наземные роботы

Введение

Повышение автономности функционирования отдельных роботов и группы в целом является актуальной научно-исследовательской задачей [1–3]. Источником питания наземного робота, как правило, является аккумуляторная батарея. Также можно встретить роботов, на которых помимо аккумуляторной батареи предусмотрен иной источник энергии, например генератор на основе двигателя внутреннего сгорания, или применяются альтернативные источники энергии, такие как солнечные батареи. Перечисленные решения, как правило, устанавливаются на роботах больших размеров с высоким уровнем энергопотребления [4]. В отсутствие упомянутых источников энергии время автономной работы робота определяется его энергопотреблением и характеристиками батареи. Соответственно, время функционирования робота будет конечным. По оконча-

нии заряда батареи роботу необходимо осуществить пополнение энергетических ресурсов. Нередко решение данной задачи происходит либо с помощью человека, либо с использованием зарядных станций с контактными системами передачи энергии. Зарядная станция для робота с применением контактных пар является простым решением, однако ее использование не всегда надежно и возможно. Ранее в ряде работ авторами была представлена разработка двунаправленной беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) [5, 6]. Применение системы предполагалось для эксплуатации в составе робототехнических средств наземного и подводного базирования [7] для обеспечения заряда аккумуляторной батареи (АКБ) от зарядной станции или обмена энергетическими ресурсами между роботами группы. Интеграция БСПЭ в систему управления робота требует разработки соответствующих аппаратных и алгоритмических решений.

Алгоритмы управления приемной частью однонаправленной БСПЭ при заряде аккумуляторной батареи рассматриваются в работе [8]. В работе предлагаются режимы заряда с по-

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-3094.2022.1.6.

стоянным током и постоянным напряжением, основанные на управлении фазовым сдвигом управляемого выпрямителя, и стратегия оптимизации эффективности, основанная на согласовании динамического эквивалентного импеданса. Из результатов экспериментов, проведенных авторами, следует, что применение предлагаемого подхода позволяет повысить общую эффективность системы более чем на 2 %. Аналогичные задачи решаются в работах [9, 10].

Управление передаваемой мощностью БСПЭ рассматривается авторами работы [11]. Предлагаемые решения предназначены для заряда батарей электротранспорта. Суть разработанного подхода состоит в регулировании тока нагрузки и напряжения приемной части системы посредством управления параметрами преобразователя передающей части. Между частями системы реализован обмен данными, на основе которых регулируется передаваемая мощность. Проблема управления мощностью БСПЭ также рассматривается в работах [12, 13].

В статье [14] рассматривается алгоритм контроля мощности БСПЭ для снижения уровня электромагнитных помех. Авторы провели симуляцию в специализированном программном обеспечении, где определили уровень воздействия излучения БСПЭ с передаваемой мощностью 100 Вт на человека. Разработан алгоритм, который регулирует выходную мощность системы на основе информации о месте расположения человека относительно робота.

Подход к адаптивной регулировке частоты для поддержания уровня передаваемой мощности БСПЭ предложен в работе [15]. Авторы решают проблему расщепления частоты, при которой искажается форма кривой ЭДС в приемной катушке. Между приемной и передающей частями системы реализован обмен данными. В подходе применяется улучшенный алгоритм муравьиной колонии с помощью которого определяются параметры для максимизации передаваемой мощности в реальном времени.

На текущий момент исследования в области управления БСПЭ сосредоточены на разработке алгоритмов мониторинга и управления передаваемой мощностью однонаправленных систем. Авторы предлагают различные подходы для повышения эффективности передачи энергии, минимизации электромагнитных помех и увеличения передаваемой мощности. Предлагаемые в исследовательских работах алгоритмы мониторинга и управления БСПЭ не учи-

тывают особенностей эксплуатации системы, реализованной с применением в схемотехнических решениях неуправляемого резонансного автогенератора, частото задающим контуром которого является передающий резонансный контур. Также не рассматриваются вопросы интеграции двунаправленной БСПЭ в основную систему управления объекта эксплуатации. Применение двунаправленной БСПЭ для обмена энергетическими ресурсами между роботами требует разработки соответствующих алгоритмов и аппаратных решений для интеграции в основную систему управления роботом.

Архитектура системы управления и схемотехнические решения двунаправленной БСПЭ

В рамках данной работы эксплуатация двунаправленной БСПЭ рассматривается в составе группы автономных наземных роботов. Каждый робот имеет собственную систему управления (СУ), реализация которой возможна по распределенным принципам [16]. В указанной работе представлена архитектура распределенной централизованной системы управления и обобщенная структура модулей для ее реализации. Предлагаемая архитектура, обладающая свойствами масштабируемости и адаптируемости, состоит из трех уровней и может применяться для автономных робототехнических комплексов различного назначения и беспилотных аппаратов. Таким образом, контроль двунаправленной БСПЭ может осуществляться отдельным аппаратным модулем уровня устройств, структурная схема которого представлена на рис. 1.

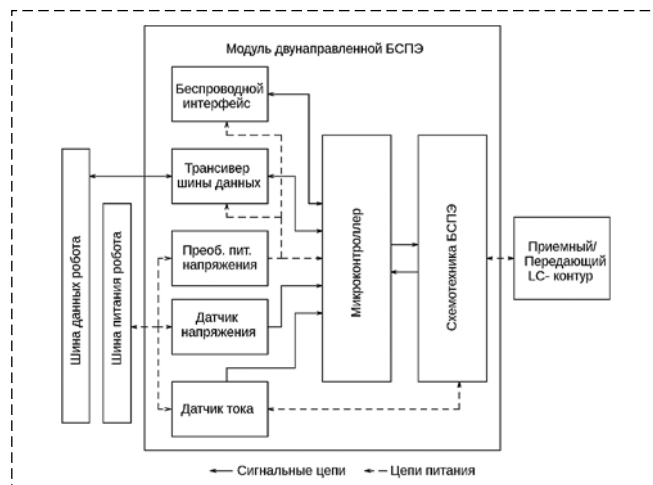


Рис. 1. Структурная схема модуля двунаправленной БСПЭ
Fig. 1. Block diagram of the bidirectional WPT-system module

Модуль двунаправленной БСПЭ имеет подключение к внутрисистемной шине данных робота и общей шине питания. Структурная схема модулей уровня устройств предполагает использование низкоуровневого вычислителя, в качестве которого применяется микроконтроллер. Обмен командами и сообщениями между модулем и высокоуровневым вычислителем системы управления робота осуществляется через внутрисистемную шину данных. Для этого модуль включает блок "трансивер шины данных", который обеспечивает аппаратную реализацию соответствующего интерфейса, а также выполняет функции согласования уровней сигналов и защиты. Блок "беспроводной интерфейс" необходим для реализации обмена рабочей информацией и параметрами между модулями двунаправленной БСПЭ, установленными в разных роботах. Реализация передачи данных между частями двунаправленной БСПЭ принципиально возможна с использованием базовых схемотехнических решений, но осложнена ввиду низкой рабочей частоты и использования неуправляемого резонансного автогенератора. Данная задача актуальна при эксплуатации БСПЭ в составе автономных необитаемых подводных аппаратов, однако для наземных роботов можно использовать существующие решения беспроводных интерфейсов передачи данных. Микроконтроллер, трансивер шины данных и беспроводной интерфейс, как правило, имеют уровни питающего напряжения, значительно отличающиеся от уровня напряжения источника питания робота, ввиду чего требуется использовать блок "Преобразователи питающего напряжения". Данный блок осуществляет формирование всех необходимых уровней напряжения внутри модуля. Датчики тока и напряжения необходимы для измерения рабочих параметров БСПЭ. При этом стоит отметить, что датчик тока должен иметь возможность измерения тока в любом направлении его протекания, так как рассматривается двунаправленная передача энергии.

Блок "схемотехника БСПЭ" представляет собой реализацию принципиальной электрической схемы, представленной в упрощенном виде на рис. 2.

На рис. 2 обозначены следующие блоки и цепи: 1 — приемный/передающий LC-контур; 2 — ключевой элемент; 3 — повышающий DC-DC-преобразователь; ТМ/РМ — электрическая цепь управления режимом работы;

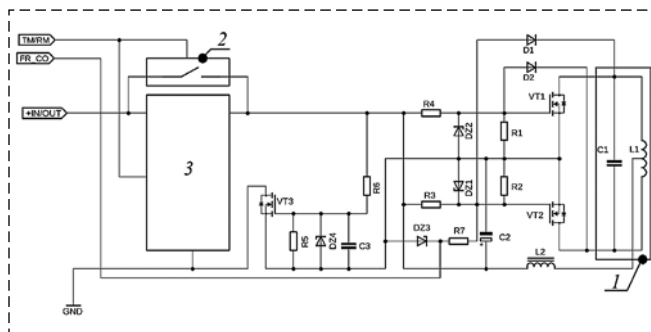


Рис. 2. Принципиальная схема двунаправленной БСПЭ
Fig. 2. Schematic diagram of bidirectional WPT-system

FR_CO — электрическая цепь контроля частоты; + IN/OUT — электрическая цепь питания.

Приемный/передающий LC-контур в соответствии со структурной схемой вынесен за пределы модуля. Цепь питания подключается к датчику тока модуля БСПЭ, а цепи управления режимом работы и контроля частоты — к микроконтроллеру. Микроконтроллер имеет возможность чтения сигнала с цепи контроля частоты и подачи сигнала в цепь выбора режима работы для управления ключевым элементом и повышающим DC-DC-преобразователем. При работе резонансного автогенератора в цепи контроля частоты присутствуют импульсы прямоугольной формы, частота которых пропорциональна рабочей частоте. Цепь выбора режима работы осуществляет переключение системы между передачей и приемом энергии. В режиме передачи энергии ключевой элемент позволяет протекать току от источника питания ко входу резонансного автогенератора, при этом выключается DC-DC-преобразователь. В режиме приема энергии DC-DC-преобразователь включен, а ключевой элемент разомкнут. Ток, выпрямленный резонансным автогенератором, который работает в данном режиме как синхронный выпрямитель, поступает на вход повышающего DC-DC-преобразователя.

Схемотехнические решения двунаправленной БСПЭ и принципы их работы подробно рассмотрены в предыдущих работах авторов [5, 6].

Алгоритмы функционирования модуля БСПЭ

Для описанной выше структурной схемы и принципов работы общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ будет иметь вид, представленный на рис. 3. Программное обеспечение микроконтроллера

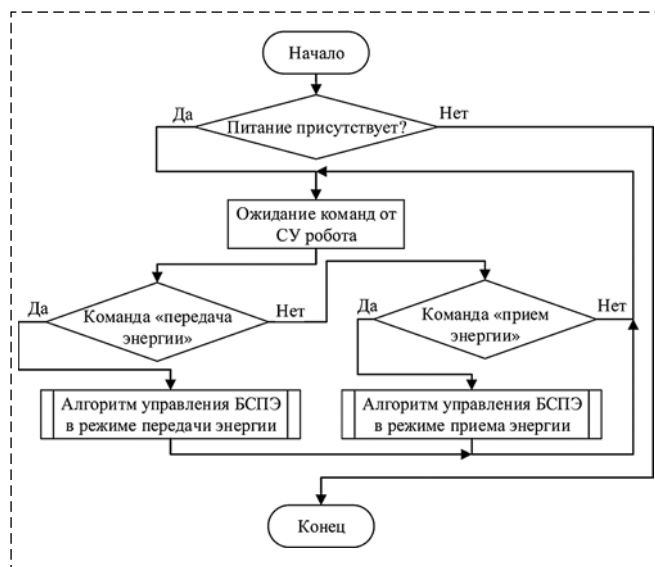


Рис. 3. Общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ

Fig. 3. General algorithm for the functioning of the bidirectional WPT-system module

модуля двунаправленной БСПЭ функционирует в условно бесконечном цикле, пока присутствует питание микроконтроллера, что отражено в первом блоке алгоритма.

При наличии питания модуль БСПЭ ожидает команды от СУ робота. В случае поступления команды "передача энергии" функционирование модуля продолжается по алгоритму в режиме передачи энергии, блок-схема которого приведена на рис. 4. В случае поступления команды "прием энергии" модуль осуществляет работу по алгоритму, представленному на рис. 5.

На первом шаге алгоритма управления БСПЭ в режиме передачи энергии осуществляется проверка сигнала контроля частоты. В соответствии с описанием схемотехнических решений сигнал в цепи контроля частоты позволяет определить текущий режим работы части системы, которая установлена в другом роботе и должна принимать энергию. Если до начала передачи энергии в данной цепи присутствует сигнал с импульсами прямоугольной формы и в заданном диапазоне частот, то из этого следует, что часть БСПЭ, установленная в другом роботе, которая должна принимать энергию, в текущий момент осуществляет ее передачу. В данном случае запуск невозможен, так как может вызвать повреждение силовых электронных компонентов БСПЭ. Если запуск невозможен, то СУ робота отправляется соответствующее сообщение, после чего вложенный алгоритм завершает свою работу, а в общем алгоритме

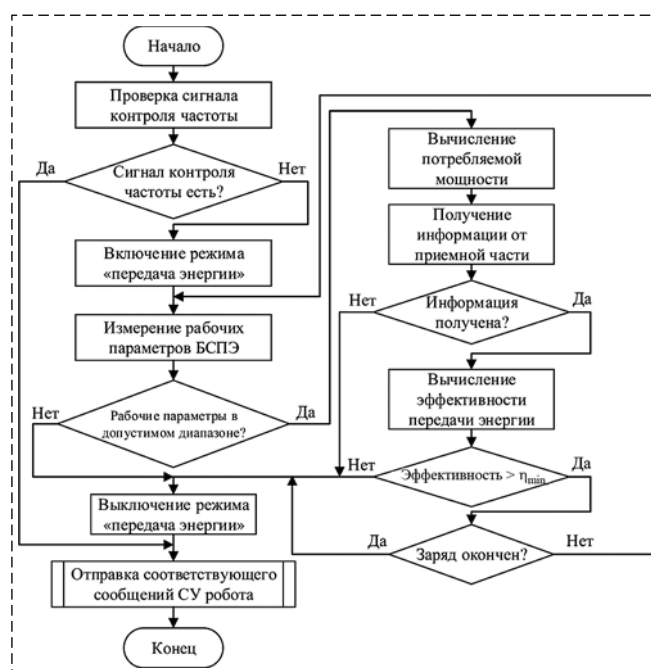


Рис. 4. Алгоритм управления БСПЭ в режиме передачи энергии
Fig. 4. Algorithm for the operation of WPT-system in the power transmission mode

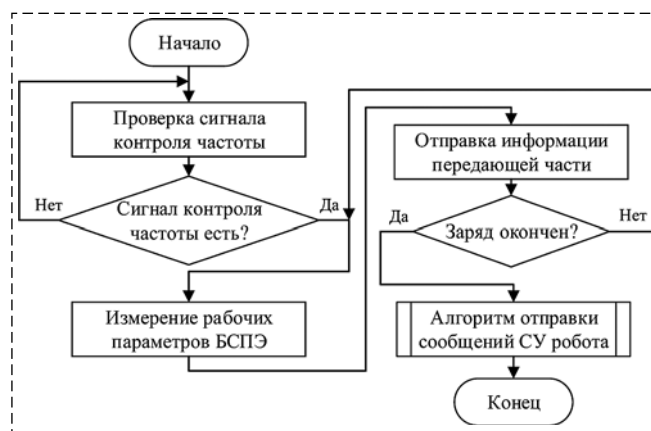


Рис. 5. Алгоритм управления БСПЭ в режиме приема энергии
Fig. 5. Algorithm for the operation of WPT-system in the power receiving mode

происходит переход к ожиданию команд. Сообщения, отправляемые СУ робота от модуля двунаправленной БСПЭ, соответствующие им параметры и условия представлены в табл. 1.

В случае отсутствия соответствующего сигнала в цепи контроля частоты включается режим передачи энергии и происходит измерение рабочих параметров БСПЭ. Если параметры находятся в допустимом диапазоне, то вычисляется потребляемая мощность, для того чтобы осуществить дальнейший расчет эффективности передачи энергии. Для расчета эффективности передачи энергии необходима информация от приемной части системы о значении напряже-

ния и тока нагрузки в текущий момент. В случае, если информация от приемной части не получена, режим передачи энергии выключается, СУ робота отправляется соответствующее сообщение, и происходит переход к ожиданию команд в основном алгоритме. Если эффективность энергии больше минимального заданного значения, то выполняется проверка уровня заряда аккумуляторной батареи, информация о котором предоставляется приемной частью системы. Пока процесс заряда не завершен, а все рабочие параметры и эффективность передачи энергии находятся в допустимом диапазоне, работа системы в режиме передачи продолжается с циклической проверкой данных параметров. По окончании процесса заряда модуль двунаправленной БСПЭ отправляет соответствующее сообщение (табл. 1) СУ робота.

Функционирование модуля осуществляется в режиме приема энергии при получении соответствующей команды от СУ робота.

Основными операциями алгоритма (рис. 5) являются измерение рабочих параметров БСПЭ и отправка этой информации на передающую часть. По окончании заряда модуль информирует СУ робота, а алгоритм управления БСПЭ в режиме приема энергии завершает свою работу.

Параметры в табл. 1 для режима передачи энергии имеют следующие значения: $I_{\min}$ — минимальное значение силы тока потребле-

ния; $I_{\max}$ — максимальное значение силы тока потребления; $F_{\max}$ — максимальное значение рабочей частоты; $U_{\min}$ — минимальное значение напряжения питания; $\eta_{\min}$ — минимальное значение эффективности передачи энергии.

В представленных алгоритмах подразумевается, что модуль двунаправленной БСПЭ имеет питание от основного уровня напряжения робота, который соответствует напряжению АКБ робота. Критерием для определения окончания заряда может служить уровень напряжения, измеряемый частью БСПЭ, которая функционирует в режиме приема энергии. В гомогенной группе АКБ, а соответственно, и их параметры будут одинаковы. В этом случае оценку уровня заряда батареи робота, которому передается энергия, возможно осуществлять в модуле двунаправленной БСПЭ, который передает энергию.

Экспериментальная проверка

Наземная робототехническая платформа, представленная на рис. 6 (см. третью сторону обложки), предназначена для учебных и исследовательских задач в области группового управления и имеет размеры 220×220×195 мм. Для проведения экспериментов и апробации алгоритмов платформы оборудовались двунаправленной БСПЭ с максимальной передаваемой мощностью 45 Вт.

АКБ имеет номинальное рабочее напряжение 7,4 В и емкость 5 А·ч. Базовая комплектация платформы обеспечивает автономное движение по заранее заданному маршруту, преодоление препятствий, передачу видеопотока с обзорной камеры, распознавание различных маркеров с использованием камеры технического зрения [17].

Проведен ряд экспериментов, направленных на апробацию разработанных аппаратных и программных решений для энергетического обмена между роботами. Роботы функционировали в области рабочего поля, на котором кругами различных цветов были отмечены точки условных задач и точки обмена энергетическими ресурсами (рис. 7, см. третью сторону обложки).

Белыми кругами в области рабочего поля обозначены точки обмена энергетическими ресурсами. Роботы выполняли позиционирование в данных точках, и один из роботов передавал другому энергетические ресурсы по-

Таблица 1
Table 1

Сообщения модуля двунаправленной БСПЭ
Messages of the bidirectional WPT-system module

Условие	Сообщение
Режим передачи энергии	
Присутствует сигнал в цепи контроля частоты	"Передача не возможна"
Сила тока потребления < $I_{\min}$	"Нет нагрузки"
Сила тока потребления > $I_{\max}$	"Перегрузка"
Рабочая частота > $F_{\max}$	"Не номинальный режим работы"
Напряжение питания < $U_{\min}$	"Низкий заряд батареи"
Информация от приемной части отсутствует	"Нет связи с приемной частью"
Эффективность < $\eta_{\min}$	"Низкая точность позиционирования"
Заряд окончен	"Заряд окончен"
Режим приема энергии	
Заряд окончен	"Заряд окончен"

Таблица 2
Table 2

Смещения и расстояния между частями двунаправленной БСПЭ
Offsets and distances between parts of a bidirectional WPT-system

Эксперимент	Кривая Т	Кривая Т1	Кривая Т2	Кривая Т3
Расстояние, мм	0	4	7	15
Смещение, мм	0	4	13	4

средством двунаправленной БСПЭ. В табл. 2 представлены значения смещений и расстояний между приемной и передающей частями двунаправленной БСПЭ при проведении экспериментов. Значения приведены при измерении относительно оси, проходящей через центр плоской спиралевидной катушки резонансного контура.

Результаты экспериментов, в которых фиксировалось время заряда (t) АКБ платформы, представлены на рис. 8.

Режим заряда АКБ робота обеспечивает DC-DC повышающим преобразователем, который входит в состав модуля двунаправленной БСПЭ. Зарядный ток ограничен величиной 5 А, а конечное напряжение заряда составляет 8,4 В. Уровень заряда АКБ (C) на представленном графике показан в относительных единицах: $C = C_{pr}/C_{max} \cdot 100 \%$. Значение C_{pr} определяется исходя из напряжения элемента *Li-ion*-АКБ в соответствии с графиком кривой заряда [18]. Значение C_{max} соответствует максимальной емкости элемента батареи. В экспериментах рассматривается задача пополнения энергетических ресурсов одного из роботов другим роботом. Так как энергия передается между роботами с одинаковой АКБ, рассматривается заряд батареи с уровня 50 %

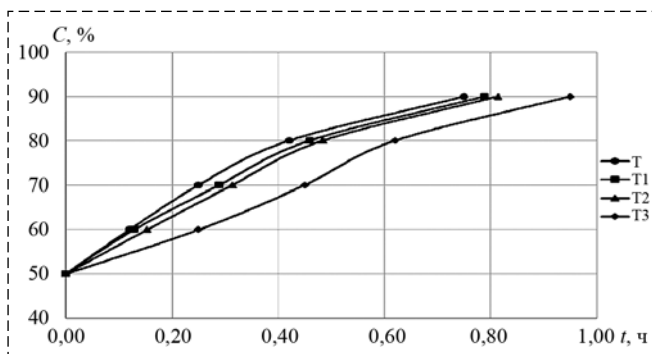


Рис. 8. Время заряда аккумуляторной батареи платформы в зависимости от точности позиционирования

Fig. 8. Platform battery charging time depending on positioning accuracy

до уровня 90 %, причем верхняя граница выбрана такой исходя из временных затрат. Обеспечение заряда *Li-ion*-АКБ с уровня 90 % до 100 % требует значительных временных затрат по сравнению с циклом заряда до 80...90 %. Кривая "Т" представляет собой вариант заряда АКБ, при котором БСПЭ не вносит никаких ограничений в скорость заряда. Соответственно, аналогичное время заряда будет при использовании контактного способа.

Общее время заряда при наличии расстояния и смещении между катушками, равного 4 мм, составляет 48 мин, что на 5 % больше, чем время заряда в идеальном случае. Снижение точности позиционирования увеличивает время заряда АКБ, так как снижается максимальная передаваемая мощность БСПЭ, а соответственно, падает зарядный ток. Максимальная разница во времени заряда по сравнению со случаем без смещений составила 12 мин и соответствует расстоянию между роботами 15 мм.

Заключение

Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять управление и контроль двунаправленной БСПЭ. Использование БСПЭ рассматривается в составе распределенной системы управления автономного наземного робота. Предложенные алгоритмы реализуют функции защиты, которые учитывают специфику разработанных схемотехнических решений.

Получены результаты общего времени заряда АКБ платформ с уровня 50 % заряда до уровня 90 % для четырех вариантов точности позиционирования роботов. Минимальное время заряда батареи робота составило 45 мин и соответствует идеальному позиционированию роботов без расстояния и смещения между катушками. Время заряда при расстоянии между катушками БСПЭ, равном 4 мм, и осевом смещении 4 мм составляет 48 мин, что на 5 % больше, чем время заряда в идеальном случае или при использовании контактных способов. В двух других случаях при более низкой точности позиционирования время заряда составило 49 и 57 мин. Стоит отметить, что при использовании контактных способов передачи энергии роботу при данных расстояниях и смещениях заряд батареи был бы невозможен. Применение БСПЭ для энергетического обмена между наземными роботами

или для заряда роботов на зарядной станции позволяет повысить автономность функционирования группы, так как даже при низкой точности позиционирования передача энергетических ресурсов выполняется успешно.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку подхода к управлению передаваемой мощностью БСПЭ для повышения эффективности при обеспечении режима заряда батареи робота.

Список литературы

1. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений // Информатика и автоматизация. 2022. № 4 (21). С. 729–757. DOI:10.15622/ia.21.4.4
2. Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Хуа Ч. Моделирование и анализ движения группы мобильных роботов в среде ROS // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 18(5). С. 317–320. <https://doi.org/10.17587/mau.18.317-320>
3. Zakiev A., Tsoy T., Magid E. Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification // Lecture Notes in Computer Science (incl. subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. Vol. 11097. P. 291–300.
4. Черских Е. О., Ерашов А. А., Быков А. Н. Анализ и классификация автономных робототехнических систем по параметру энергопотребления // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 2. С. 56–80. <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505>
5. Krestovnikov, K., Cherskikh, E., Saveliy A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics // Radioengineering. 2021. Vol. 30, N. 1. P. 142–149. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>
6. Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots // Serbian Journal of Electrical Engineering. 2021. Vol. 18, N. 2. P. 171–192. <https://doi.org/10.2298/SJEE2102171K>
7. Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Савельев А. И. Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4. Часть 1. С. 144–155. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>

8. Zhang M., Tan L., Li J., Huang X. The Charging Control and Efficiency Optimization Strategy for WPT System Based on Secondary Side Controllable Rectifier // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 127993–128004. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007444
9. Liu Y., Feng H. Maximum efficiency tracking control method for WPT system based on dynamic coupling coefficient identification and impedance matching network // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2019. Vol. 8, N. 4. P. 3633–3643. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2935219
10. Ishihara H. et al. A voltage ratio-based efficiency control method for 3 kW wireless power transmission // 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. 2014. P. 1312–1316. doi: 10.1109/APEC.2014.6803476
11. Miller J. M., Onar O. C., Chinthavali M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging // IEEE journal of Emerging and selected topics in power electronics. 2014. Vol. 3, N. 1. P. 147–162. DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2382569
12. Chao Y. H., Shieh J. J., Pan C. T., Shen W. C., Chen M. P. A primary-side control strategy for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems // 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China. 2007. P. 2322–2327. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318825
13. Li H. L., Hu A. P., Covic G. A., ChunSen Tang. A new primary power regulation method for contactless power transfer // 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. Churchill, VIC, Australia. 2009. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIT.2009.4939680
14. Kim S. M., Cho I. K., Moon J. I., Yoon J. H., Byun W. J., Choi H. D. System level power control algorithm in wireless power transmission for reducing EMF. // 2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference, Jeju, Korea (South). 2014. P. 193–196. DOI: 10.1109/WPT.2014.6839580
15. Li Y. et al. Improved ant colony algorithm for adaptive frequency-tracking control in WPT system // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2018. Vol. 12, N. 1. P. 23–28.
16. Крестовников К. Д., Ерашов А. А. Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 3. С. 201–212. DOI: 10.31776/RTSJ.10305
17. Zakiev A., Shabalina K., Tsoy T., Magid E. Pilot Virtual Experiments on ArUco and ArTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. N. 154. P. 455–464. DOI:10.1007/978-981-13-9267-2_37
18. EEMB Co., Ltd. LIR18650 Lithium-ion Battery Datasheet. URL: <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>, 2010 (дата обращения: 5 мая 2023 г.)

Control Algorithms for a Bidirectional Wireless Power Transmission System at the Redistribution of Energy Resources in a Group of Ground Robots

K. D. Krestovnikov, k.krestovnikov@ias.spb.su,

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: Krestovnikov K. D., Junior Researcher,
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg 199178, Russian Federation, e-mail: k.krestovnikov@ias.spb.su

Accepted on June 07, 2023

Abstract

Redistributing energy resources within a group of ground robots allows for an increase in the reachable workspace area and expands its functional capabilities. The use of wireless energy transfer systems for exchanging energy resources between

ground robots reduces the requirements for positioning accuracy and enhances the reliability of the robotic system. This study examines control and management algorithms for a bidirectional wireless energy transfer system when operating as part of a ground robot. A structural diagram of the bidirectional wireless energy transfer module is proposed for integration into the robot's control system, built on distributed principles. The developed algorithms take into account the specific features of the circuitry solutions of the bidirectional wireless energy transfer system, implemented using an uncontrolled resonant generator. The proposed solutions are tested on a robotics platform. The experiments focus on the process of replenishing the energy resources of one robot with another robot. Energy is transmitted between robots equipped with the same Li-ion battery, which has a nominal voltage of 7.4 V and a capacity of 5 A·h. The battery is charged from 50 % to 90 % capacity with different positioning accuracies of the robots. When there is a displacement of 4 mm and a distance of 4 mm between the receiving and transmitting coils, the charging time was 48 minutes, which is 5 % longer than the wired charging method. The maximum charging time reached 57 minutes with a distance of 15 mm between the robots. The use of bidirectional wireless power transfer for energy exchange between ground robots or for charging robots at a charging station enhances the autonomy of the group's operation, as energy transfer can be successfully achieved even with low positioning accuracy. The proposed solutions can be used for battery charging and resource redistribution processes in groups of ground and underwater robots.

Keywords: wireless power transmission, group control, control algorithms, robot control system, ground robots

For citation:

Krestovnikov K. D. Control Algorithms for a Bidirectional Wireless Power Transmission System at the Redistribution of Energy Resources in a Group of Ground Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 481–488 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.481-488

References

1. Darintsev O., Migranov A. Analytical Review of Approaches to the Distribution of Tasks for Mobile Robot teams Based on Soft Computing Technologies, *Informatics and Automation*, 2022, no. 21(4), pp. 729–757, <https://doi.org/10.15622/ia.21.4.4> (in Russian).
2. Zenkevich S. L., Nazarova A. V., Hua Z. Simulation and Analysis of the Movement of a Group of Mobile Robots in ROS, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 317–320, <https://doi.org/10.17587/mau.18.317-320> (in Russian).
3. Zakiev A., Tsoy T., Magid E. Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification, *Lecture Notes in Computer Science (incl. subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 11097, pp. 291–300.
4. Cherskikh E. O., Erashov A. A., Bykov A. N. Analysis and classification of autonomous robotic systems according to the energy consumption parameter, *Vestnik VGU. Series: System Analysis and Information Technologies*, 2021, no. 2, pp. 56–80, <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3505> (in Russian).
5. Krestovnikov K., Cherskikh E., Savelyev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics, *Radioengineering*, 2021, vol. 30, no. 1, pp. 142–149, <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>.
6. Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 171–192, <https://doi.org/10.2298/SJEE2102171K>.
7. Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Savelyev A. I. Approach to wireless battery charging of autonomous uninhabited underwater vehicles, *Marine Intelligent Technologies*, 2022, no. 4 part 1, pp. 144–155, <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>.
8. Zhang M., Tan L., Li J., Huang X. The Charging Control and Efficiency Optimization Strategy for WPT System Based on Secondary Side Controllable Rectifier, in *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 127993–128004, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007444.
9. Liu Y., Feng H. Maximum efficiency tracking control method for WPT system based on dynamic coupling coefficient identification and impedance matching network, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, vol. 8, no. 4, pp. 3633–3643, DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2935219.
10. Ishihara H., Moritsuka F., Kudo H., Obayashi S., Itakura T., Matsushita A., Mochikawa H., Otaka S. A voltage ratio-based efficiency control method for 3 kW wireless power transmission, *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014*, 2014, pp. 1312–1316, DOI: 10.1109/APEC.2014.6803476.
11. Miller J. M., Onar O. C., Chinthavali M. Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging, *IEEE journal of Emerging and selected topics in power electronics*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 147–162, DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2382569.
12. Chao Y. H., Shieh J. J., Pan C. T., Shen W. C., Chen M. P. A primary-side control strategy for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems, *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China*, 2007, pp. 2322–2327, DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318825.
13. Li H. L., Hu A. P., Covic G. A., ChunSen Tang. A new primary power regulation method for contactless power transfer, *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, VIC, Australia*, 2009, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICIT.2009.4939680.
14. Kim S. M., Cho I. K., Moon J. I., Yoon J. H., Byun W. J., Choi H. D. System level power control algorithm in wireless power transmission for reducing EMF, *2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference, Jeju, Korea (South)*, 2014, pp. 193–196, DOI: 10.1109/WPT.2014.6839580.
15. Li Y., Zhang C., Yang Q., Li J., Zhang Y., Zhang X., Xue M. Improved ant colony algorithm for adaptive frequency-tracking control in WPT system, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 23–28.
16. Krestovnikov K. D., Erashov A. A. Development of architecture and generalized structure of modules for a distributed control system for robotic complexes for various purposes, *Robotics and technical cybernetics*, 2022, vol. 10, no. 3, pp. 201–212, DOI: 10.31776/RTCJ.10305 (in Russian).
17. Zakiev A., Shabalina K., Tsoy T., Magid E. Pilot Virtual Experiments on ArUco and ArTag Systems Comparison for Fiducial Marker Rotation Resistance, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2019, no. 154, pp. 455–464, DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_37.
18. EEMB Co., Ltd. LIR18650 Lithium-ion Battery Data-sheet, available at: <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3ef3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>, 2010 (Retrieved: May 5, 2023)

Ю. В. Кожевников, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д-р техн. наук, проф.,
Г. П. Шибанов, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д-р техн. наук, проф., gprshibanov@mail.ru,
Государственный летно-испытательный центр им. В. П. Чкалова

Оптимальное осреднение высотно-скоростных характеристик летательных аппаратов при их летных испытаниях

В детерминированных моделях управления используется минимум информации о действующих физических факторах, представленный некоторой системой осредненных данных. При наличии статистической информации о возмущениях при применении летательных аппаратов (ЛА) критерий оптимизации должен учитывать и такой фактор, как частота или вероятность (плотность вероятности) той или иной реализации вектора случайных возмущений и применений ЛА. Переменная часть управляющих факторов ЛА, учитывающая реализации случайных параметров, при этом должна обеспечивать выполнение конкретных реализаций целей, в том числе и в наиболее неблагоприятных обстоятельствах. Такого рода подход к проблеме требует включения в число критериев оптимальности достижение экстремумов математических ожиданий функционалов качества ЛА, в том числе вероятностей успешного выполнения полетных заданий.

Определение неслучайных управляющих решений (программы полета, номинальных значений основных проектных параметров, законов управления движением и т. п.) с учетом таких критериев будем называть задачей оптимального осреднения или статистической оптимизацией высотно-скоростных характеристик ЛА.

При решении статистических задач оптимизации возникают новые достаточно серьезные трудности. Они связаны как с решением теоретических вопросов, не встречавшихся при анализе детерминированных моделей, так и с организацией численных процедур. Последние реализуются со значительным увеличением машинного времени и использованием в целом ряде случаев методов статистического моделирования свойств исследуемых ЛА и процессов, с ними связанных. При решении ряда задач статистической оптимизации предполагаются известными также и статистические данные о вариантах, режимах и способах применения ЛА конкретного типа, получаемые на основе анализа опыта их эксплуатации.

Можно ожидать, что применение критериев статистической оптимизации будет стимулировать и направлять работу по изучению статистики эксплуатации и применений ЛА по их прямому назначению. Методы оптимизации предполагают произвольный закон распределения случайных характеристик; достоверность выводов, естественно, зависит от достоверности имеющихся статистических характеристик.

Ключевые слова: летательный аппарат, объект управления, физические факторы, функционал качества объекта управления, оптимальное осреднение

Постановка задачи и пути ее решения

В конце 80-х годов прошлого столетия были приняты на вооружение боевые летательные аппараты (ЛА) типа МиГ-25П и МиГ-25 РБ, скорость которых в процессе летных испытаний достигала 2,5...3,0 М, а высота — более 20 км. Указанные высотно-скоростные характеристики были получены в процессе государственных летных испытаний упомянутых ЛА, проводившихся в Астраханской области и северо-западных районах Казахстана. Однако при последующей эксплуатации этих ЛА в различных климатических и географических зонах (Заполярье, Дальний Восток, Сибирь, Средняя Азия, Кавказ и т. д.) выявилось, что их основные летно-технические характеристики по данным

зонам серьезно отличаются от тех, которые были получены при государственных испытаниях. Такие отличия стали еще существеннее на современных гиперзвуковых высотных ЛА. В конечном итоге выяснилось, что всесторонне оценить их высотно-скоростные и иные характеристики можно лишь с учетом влияния на них радиационных, электромагнитных, гравитационных и иных известных полей Земли, а также изменений характеристик окружающей среды, например, температуры, влажности, плотности и ее состава по высотам и регионам эксплуатации ЛА. Отметим, что по данным характеристикам окружающей среды нужна надежная статистика и возможности ее математического моделирования с учетом появляющихся под влиянием среды случайных отказов

и неисправностей бортового оборудования и вынужденных изменений полетных заданий.

Вместе с тем, оптимальные решения задач динамики объекта управления типа ЛА всех видов и назначений с силовыми установками, имеющими относительно малые расходы топлива и тяги, до сего времени сводились к отысканию экстремума функции одного или нескольких аргументов, в предположении неизменности некоторых характеристик. Например, неизменными и наперед заданными в случае кратковременных полетов считали массу ЛА и режим работы силовой установки; в случае продолжительных полетов считали неизменными угол наклона траектории к горизонту и угол атаки. Достоинства такого подхода к процессу проектирования ЛА просматриваются в простоте и наглядности решения исходных уравнений, что позволяет получать довольно простые и удобные для практики приближенные признаки оптимальности [1–4].

Такие характеристики ЛА, как, например, расход топлива, продолжительность полета, точность попадания в заданную область, зависят от того, как совершается полет, каковы траектория и режим работы силовой установки [5–7]. Таким образом, и расход топлива, и продолжительность полета, и другие характеристики ЛА, экстремум которых достигается в оптимальном режиме полета, являются величинами, зависящими от выбора режимных функций, т. е. функционалами. Определение же экстремумов функционалов при различных дополнительных условиях — основной предмет современной теории оптимизации. Задачи же оптимизации управления ЛА до сего времени решались главным образом в детерминированной постановке вопроса относительно единичных фиксированных условий и целей их применения [2, 5, 8, 9].

Нельзя не отметить, что в детерминированных моделях используется минимум информации о действующих физических факторах, представленный некоторой системой осредненных данных. При наличии статистической информации о возмущениях в целях применения ЛА критерий оптимизации должен учитывать и такой фактор, как частота или вероятность (плотность вероятности) той или иной реализации вектора случайных возмущений и применений ЛА. Переменная часть управляющих факторов ЛА, учитывающая реализации случайных параметров, при этом должна обеспечивать выполнение конкретных реализа-

ций целей, в том числе и в наиболее неблагоприятных обстоятельствах. Такого рода подход к проблеме требует включения в число критериев оптимальности достижение экстремумов математических ожиданий функционалов качества ЛА, в том числе вероятностей успешного выполнения полетных заданий.

Определение неслучайных управляющих решений (программы движения, номинальных значений основных проектных параметров, законов управления движением ЛА и т. п.) с учетом таких критериев будем называть задачей оптимального осреднения или статистической оптимизацией высотно-скоростных характеристик ЛА.

При решении ряда задач статистической оптимизации ЛА предполагаются известными также и статистические данные о вариантах, режимах и способах применения ЛА конкретного типа, получаемые на основе анализа опыта их эксплуатации.

Можно ожидать, что применение критериев статистической оптимизации будет стимулировать и направлять работу по изучению статистики эксплуатации и применений ЛА по назначению, например, там, где эта работа еще не проводилась. Методы оптимизации предполагают произвольный закон распределения случайных характеристик; достоверность выводов, естественно, зависит от достоверности имеющихся статистических характеристик.

Решение поставленной задачи

С учетом сказанного при постановке задачи ниже предлагается конкретный алгоритм реализации процедуры статистической оптимизации высотно-скоростных характеристик ЛА с использованием в качестве критерия оптимальности достижение экстремумов математических ожиданий функционала качества ЛА, в том числе вероятностей успешного выполнения полетных заданий.

Начнем с ЛА, траектория перемещения которого в пространстве описывается уравнениями вида

$$\begin{aligned}\dot{X}_i &= \phi_i(t, X, u, a, B), T_0 \leq t \leq T_1 \quad (i = 1, 2, \dots, n); \\ X_i(T_0) &= X_{i0}, X_i(T_1) = X_{i1} \quad (i = 1, 2, \dots, n),\end{aligned}\quad (1)$$

где $T_0, T_1, T_0 < T_1$ — граничные значения времени — случайные величины с неперекрывающимися отрезками реализаций $[t'_0, t''_0], [t'_1, t''_1]$, $t'_0 < t''_0 \leq t'_1 < t''_1$;

$u = (u_1, \dots, u_T)$ — математическое ожидание управляющей вектор-функции системы, причем $(u_1, \dots, u_T)$ принадлежит открытому ядру области U значений кусочно-непрерывных ограниченных детерминированных функций времени с конечным числом точек разрыва первого рода на отрезке $[t'_0, t''_1]$;

$a = (a_1, \dots, a_m)$ — математическое ожидание управляющего вектора, не зависящего от времени;

$X_0 = (X_{i0})$, $B = (B_j)$ — заданные случайные векторы, не зависящие от t . В частности, B_j — коэффициенты канонических разложений случайных функций времени; $X = (X_1, \dots, X_n)$ — непрерывная случайная вектор-функция;

ϕ_i и введенные ниже функции f_i непрерывны и дважды непрерывно дифференцируемы.

Предполагается, что компоненты случайного вектора $\tilde{B} = (T_0, T_1, X_{i0}, B_j)$ заданы своей плотностью распределения $f(\tilde{b})$:

$$f(\tilde{b}) \geq 0, \int_{\Omega} f(\tilde{b}) d\tilde{b} = 1,$$

Ω — область реализации вектора $\tilde{B}$; $d\tilde{b}$ — элементарный объем пространства координат $\tilde{b} = (t_0, t_1, x_{i0}, b_j)$ — реализаций случайных величин T_0, T_1, X_{i0}, B_j .

Поставим задачу выбора управления $u(t) \in U$, a , которое доставляет экстремум функционалу

$$J = M[f_0(\bar{X}_1, a, \tilde{B})] \quad (2)$$

при соблюдении граничных условий

$$M[f_s(\bar{X}_1, a, \tilde{B})] = 0, s = 1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

где $\bar{X}_1 = (X_{11}, \dots, X_{n1})$.

Управление u , a , удовлетворяющее требованиям задачи, будем называть оптимальным в среднем (оптимально осредненным).

К решению подобной проблемы оптимального осреднения управления u , a приводятся многие прикладные задачи, например:

— выбор программы движения $u(t)$ и управляющего вектора a , обеспечивающих достижение нужного значения $M(X_{11})$ при максимуме вероятности попадания X_{11} в заданную область или минимуме дисперсии X_{11} ;

— выбор $u(t)$, a , оптимизирующих в каком-либо смысле $M(X_{11})$ при заданной точности реализации X_{11} ;

— выбор управления $u(t)$, a , которое должно оставаться неизменным в различных вариантах

использования системы, обеспечивая минимизацию среднего значения каких-либо потерь.

В частном случае соотношения (2) и (3) имеют вид

$$\begin{aligned} J &= [f_0(a_1, \dots, a_{2n})] = f_0(a_1, \dots, a_{2n}); \\ M[X_{i1} - a_i] &= M(X_{i1}) - a_i = 0; \\ M[(X_{i1} - a_i)^2 - a_{n+i}] &= D(X_{i1}) - a_{n+i} = 0; \\ M[f_j(a_1, \dots, a_{2n})] &= f_j(a_1, \dots, a_{2n}) = 0; \\ i &= 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k; k < 2n. \end{aligned}$$

Здесь знак D обозначает знак дисперсии случайной величины.

Если уравнения $f_j(a_1, \dots, a_{2n}) = 0$ дают числовые значения параметров $a_1, \dots, a_{2n-1}$, а $f_0 = a_{2n}$, то решение сформулированных задач здесь будет состоять в отыскании управления u , a , которое обеспечивает достижение заданных значений $M(X_{i1})$, $D(X_{s1})$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $s = 1, 2, \dots, n-1$) при минимуме дисперсии конечного значения фазовой координаты X_n . Если же уравнения $f_j(a_1, \dots, a_{2n}) = 0$ не ограничивают выбора a_n , a_{2n} , функция f_0 имеет вид

$$f_0 = (2\pi a_{2n})^{-1/2} \int_{l'}^{l''} \exp \left[-\frac{(t - a_n)^2}{2a_{2n}} \right] dt,$$

и закон распределения X_{n1} можно считать нормальным, то задача приводится к оптимизации u , a в смысле максимума вероятности попадания X_{n1} на отрезок $[l', l'']$.

Для оптимальности управления u , a , реализующего максимум (минимум) функционала (2) при связях (1) и граничных условиях (3), необходимо, чтобы

а) оптимальное управление u доставляло минимум (максимум) функциям

$$\begin{aligned} &\int_{t'_0}^t dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f H db_0 \quad (t'_0 \leq t \leq t''_0); \\ M(H) &= \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f H db_0 \quad (t'_0 \leq t \leq t''_1); \quad (4) \\ &\int_{t'_0}^t dt_0 \int_t^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f H db_0 \quad (t'_1 \leq t \leq t''_1) \end{aligned}$$

переменного u при любом t соответственно на отрезках времени $[t'_0, t''_0]$, $[t'_0, t'_1]$, $[t'_1, t''_1]$;

б) оптимальные параметры $a_1, a_2, \dots, a_m$ удовлетворяли условиям трансверсальности, т. е. уравнениям

$$\sum_{j=0}^k \mu_j M \left(\frac{df_j}{da_s} \right) - M \left(\int_{t'_0}^{T_1} \frac{dH}{da_s} dt \right) = 0 \quad (s = 1, 2, \dots, m). \quad (5)$$

Здесь $H(t, X, u, a, B, \mathcal{L}) = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}_i \phi_i(t, X, u, a, B)$; Ω_0 — область реализаций случайного вектора $B_0 = (X_{i0}, B_j)$; $\mu_0 = 1$; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ — постоянные неслучайные множители Лагранжа; $\mathcal{L} = (\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n)$ — случайная непрерывная вектор-функция времени, определяемая из уравнений

$$\dot{\mathcal{L}}_i = -\frac{dH}{dX_i}, \mathcal{L}_i(T_1) = \mathcal{L}_{i1} = -\sum_{j=0}^k \mu_j \frac{df_j}{dX_{i1}}; \quad (6)$$

малыми буквами обозначены реализации соответствующих случайных функций и параметров.

Поскольку область определения u открыта, а выражения (4) — непрерывны и дважды непрерывно дифференцируемы по u , то оптимальное управление u удовлетворяет приведенным ниже уравнениям:

$$\begin{aligned} \int_{t'_0}^t dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \frac{dH}{du_s} db_0 &= 0 \quad (t'_0 \leq t \leq t''_0), \\ M\left(\frac{dH}{du_s}\right) &= \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \frac{dH}{du_s} db_0 = 0 \quad (t'_0 \leq t \leq t''_1), \quad (7) \\ \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_t^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \frac{dH}{du_s} db_0 &= 0 \quad (t'_1 \leq t \leq t''_1), \\ (s = 1, 2, \dots, r). \end{aligned}$$

Если управление u, a допустимо, то каждой реализации вектора $\tilde{B}$ соответствует вектор-функция $x = (x_1, \dots, x_n)$, где x_i — известные функции переменных $t, \tilde{b}$, удовлетворяющие уравнениям

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \phi_i(t, x, u, a, b), t_0 \leq t \leq t_1 \quad (i = 1, 2, \dots, n); \\ x_i(t_0) &= x_{i0}, x_i(t_1) = x_{i1} \quad (i = 1, 2, \dots, n); \\ M[f_j(\bar{X}_1, a, \tilde{B})] &= \int_{\Omega} f(\tilde{b}) f_j(\bar{X}_1, a, \tilde{b}) d\tilde{b} = 0 \quad (8) \\ (j = 1, 2, \dots, k). \end{aligned}$$

Введем в рассмотрение управление

$$\begin{aligned} (u^*, a^*) &= (u_1^*, \dots, u_r^*, a_1^*, \dots, a_m^*), \\ u^* &= u + \delta u, a^* = a + \delta a, \\ \delta u &= (\delta u_1, \dots, \delta u_r), \delta a = (\delta a_1, \dots, \delta a_m). \end{aligned}$$

Здесь $\delta u_j = \delta u_j(t)$ — кусочно-непрерывные функции вида

$$\delta u_j = \sum_{s=1}^x a_s \delta u_{js}(t) \quad (j = 1, 2, \dots, r)$$

всюду на отрезке $[t'_0, t''_1]$, за исключением сколь угодно малого отрезка $[t', t'']$, где $\delta u_j = \omega_j - u_j$.

Предполагается, что $a = (a_1, \dots, a_x)$ — детерминированный параметр, не зависящий от времени; $t'' - t' = \tau \geq 0$; $t'_0 \leq t' \leq t'' \leq t''_1$; $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_r) \in U$; функции $u_i(t)$, $\omega_i(t)$ непрерывны и непрерывно дифференцируемы на интервале (t', t'') .

Управлению u^*, a^* и реализации $\tilde{b}$ вектора $\tilde{B}$ соответствует траектория $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$, определяемая из уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_i^* &= \phi_i(t, x^*, u^*, a^*, b) \quad (t_0 \leq t \leq t_1), \\ x_i^*(t_0) &= x_{i0}, x_i^*(t_1) = x_{i1} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (9)$$

Управление u^*, a^* можно считать допустимым, если x_{i1}^*, a_j^* ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$) удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} M[f_j(\bar{X}_1^*, a^*, \tilde{B})] &= \int_{\Omega} f(\tilde{b}) f_j(\bar{X}_1^*, a^*, \tilde{b}) d\tilde{b} = 0 \\ (j = 1, 2, \dots, k). \end{aligned} \quad (10)$$

Левые части уравнений (10) представляют собой неявные функции аргументов $\delta a_j, a_i, \tau$. Данные функции непрерывны и непрерывно дифференцируемы по всем аргументам.

Введем обозначение

$$R_{ij} = \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} \frac{dH^{(v)}}{du_i} db_0. \quad (11)$$

Тогда, учитывая формулу Дирихле, на основе (11) получим

$$\begin{aligned} \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} \delta u_{is} dt &= \int_{t'_0}^{t''_0} dt \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} \delta u_{is} dt_0; \\ \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{t'_0}^{t''_0} R_{ij} \delta u_{is} dt &= \int_{t'_1}^{t''_1} dt \int_t^{t''_1} R_{ij} \delta u_{is} dt_0. \end{aligned}$$

С учетом независимости пределов интегрирования $t'_0, t''_0, t'_1, t''_1, t$ после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} f \frac{df_j(x_1^*, a^*, \tilde{b})}{da_s} d\tilde{b} &= \sum_{i=0}^r \left[\int_{t'_0}^{t''_0} \left(\int_{t'_1}^t dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) du_{is} dt + \right. \\ &\left. + \int_{t'_1}^{t''_1} \left(\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) du_{is} dt + \int_{t'_1}^{t''_1} \left(\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_t^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) du_{is} dt \right]. \end{aligned}$$

Положим

$$\begin{aligned} B_{js} &= \sum_{i=0}^r \left[\int_{t'_0}^{t''_0} \left(\int_{t'_1}^t dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) du_{is} dt + \right. \\ &\left. + \int_{t'_1}^{t''_1} \left(\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) du_{is} dt + \int_{t'_1}^{t''_1} \left(\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_t^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) du_{is} dt \right], \end{aligned}$$

$$B_{ji} = \int_{\Omega} \left[\left(\frac{df_j}{da_i} \right) + \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} \int_{t_0}^{t_1} \frac{dH^{(v)}}{da_i} dt \right] f d\tilde{b}, \quad (12)$$

$$(j = 0, \dots, k; s = 1, \dots, \chi; i = \chi + 1, \dots, \chi + m).$$

Тогда на основе (12) можно сформулировать утверждение о существовании семейств допустимых управлений в следующем виде: если u, a — допустимое управление системы (1), (3), то существует семейство допустимых управлений, включающее u, a , если ранг матрицы

$$\begin{vmatrix} B_{11} & \cdot & \cdot & B_{1,\chi+m} \\ B_{21} & \cdot & \cdot & B_{2,\chi+m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ B_{k1} & \cdot & \cdot & B_{k,\chi+m} \end{vmatrix}$$

равняется k .

Пусть данное условие выполнено, и пусть управление u, a реализует максимум функционала (2). Тогда существует семейство допустимых управлений u^*, a^* , где удовлетворяются уравнения (10) и имеет место неравенство

$$\begin{aligned} \Delta J &= M[f_0(\bar{X}_1^*, a^*, \tilde{B})] - M[f_0(\bar{X}_1, a, \tilde{B})] = \\ &= \int_{\Omega} f[f_0(\bar{x}_1^*, a^*, \tilde{b}) - f_0(\bar{x}_1, a, \tilde{b})] d\tilde{b} \leq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Разложив в ряд Тейлора функции $f_j(\bar{x}_1^*, a^*, \tilde{b})$ по степеням малых величин $\alpha_j, \delta a_j, \tau$ в окрестности точки $(\alpha, \delta a, \tau) = (0, 0, 0)$ и учитывая соотношения (11) и (12), вместо (10) и (13) будем иметь

$$\Delta J = \sum_{s=1}^{\chi} B_{0s} \alpha_s + \sum_{i=1}^m B_{0,\chi+i} \delta a_i + \xi \leq 0; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^{\chi} B_{js} \alpha_s + \sum_{i=1}^m B_{j,\chi+i} \delta a_i + B_j \tau + \xi &= 0 \\ (j = 1, 2, \dots, k), \end{aligned} \quad (15)$$

где ξ — величина выше первого порядка малости; при $\alpha = \delta a = \tau = 0$

$$B_j = \int_{\Omega} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} \frac{dx_{v1}^*}{d\tau} d\tilde{b} \quad (j = 0, 1, \dots, k).$$

Для условий, при которых соблюдаются неравенства

$$t'_0 \leq t' \leq t''_0; \quad t''_0 \leq t' \leq t'_1; \quad t'_1 \leq t' \leq t''_1$$

можно записать соответствующие уравнения:

$$B_j = \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} [H^{(v)}(t, x, \omega, b, \lambda^{(v)}) - H^{(v)}(t, x, u, a, b, \lambda^{(v)})] t db_0;$$

$$B_j = \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} [H^{(v)}(t, x, \omega, b, \lambda^{(v)}) - H^{(v)}(t, x, u, a, b, \lambda^{(v)})] t db_0; \quad (16)$$

$$B_j = \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} [H^{(v)}(t, x, \omega, b, \lambda^{(v)}) - H^{(v)}(t, x, u, a, b, \lambda^{(v)})] t db_0.$$

Умножим левые части уравнений (15) на неопределенные постоянные множители $\mu_1, \dots, \mu_k$ и прибавим полученные результаты к выражению (14). Получим

$$\begin{aligned} \Delta J &= \sum_{s=1}^{\chi} \mu_j B_{js} \alpha_s + \sum_{s=1}^m \sum_{j=0}^k \mu_j B_{j,\chi+s} \delta a_s + \\ &+ \sum_{j=0}^k \mu_j B_j \tau + \xi \leq 0, \end{aligned}$$

где $\mu_0 = 1$.

Отсюда имеем необходимое неравенство

$$\begin{aligned} \delta J &= \sum_{s=1}^{\chi} \sum_{j=0}^k \mu_j B_{js} \alpha_s + \sum_{s=1}^m \sum_{j=0}^k \mu_j B_{j,\chi+s} \delta a_s + \\ &+ \sum_{j=0}^k \mu_j B_j \tau \leq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Параметры $\mu_1, \dots, \mu_k$ можно подобрать из условия обращения в нуль k множителей при вариациях $\alpha_s, \delta a_s$ в выражении (17). После этого в данном выражении останутся слагаемые с независимыми и произвольными вариациями $\alpha_i, \delta a_i$. Таким образом, учитывая неравенство $\tau \geq 0$, вместо (17) будем иметь

$$\sum_{j=0}^k \mu_j B_{js} = 0 \quad (s = 1, 2, \dots, \chi + m), \quad \sum_{j=0}^k \mu_j B_j \leq 0.$$

Расписывая эти условия с учетом соотношений (12) и (16), получим

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^k \mu_j \sum_{i=1}^r \left[\int_{t'_0}^{t''_0} \left(\int_{t_0}^t dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) \delta u_{is} dt + \right. \\ \left. + \int_{t'_0}^{t'_1} \left(\int_{t_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} R_{ij} dt_1 \right) \delta u_{is} dt + \right. \\ \left. + \int_{t'_1}^{t''_1} \left(\int_{t_0}^{t''_0} dt_0 \int_t^{t'_1} R_{ij} dt_1 \right) \delta u_{is} dt \right] = 0 \quad (s = 1, 2, \dots, \chi); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^k \mu_j \int_{\Omega} \left[\left(\frac{df_j}{da_i} \right) + \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} \int_{t_0}^{t_1} \frac{dH^{(v)}}{da_i} dt \right] f d\tilde{b} = 0 \\ (s = 1, 2, \dots, m); \end{aligned}$$

$$\sum_{j=0}^k \mu_j \int_{t'_0}^{t'} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} [H^{(v)}(t, x, \omega, b, \lambda^{(v)}) - H^{(v)}(t, x, u, a, b, \lambda^{(v)})] t' db_0 \leq 0$$

при $(t'_0 \leq t \leq t''_0)$;

$$\sum_{j=0}^k \mu_j \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} [H^{(v)}(t, x, \omega, b, \lambda^{(v)}) - H^{(v)}(t, x, u, a, b, \lambda^{(v)})] t' db_0 \leq 0$$

при $(t''_0 \leq t \leq t'_1)$;

$$\sum_{j=0}^k \mu_j \int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \sum_{v=1}^n \frac{df_j}{dx_{v1}} [H^{(v)}(t, x, \omega, b, \lambda^{(v)}) - H^{(v)}(t, x, u, a, b, \lambda^{(v)})] t' db_0 \leq 0 \quad (18)$$

при $(t'_1 \leq t \leq t''_1)$.

Положим, что

$$\lambda_{v1} = - \sum_{j=0}^k \mu_j \left(\frac{df_j}{dx_{v1}} \right) \text{ при } v = 1, 2, \dots, n.$$

Тогда

$$\sum_{j=0}^k \mu_j \sum_{v=1}^n \left(\frac{df_j}{dx_{v1}} \right) H^{(v)} = - \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^n \lambda_{v1} \lambda_i^{(v)} \phi_i(t, x, u, a, b).$$

Обозначив

$$\lambda_i = - \sum_{v=1}^n \lambda_{v1} \lambda_i^{(v)}, H(t, x, u, a, b, \lambda) = \sum_{v=1}^n \lambda_i \phi_i(t, x, u, a, b),$$

находим

$$\sum_{j=0}^k \mu_j \sum_{v=1}^n \left(\frac{df_j}{dx_{v1}} \right) H^{(v)} = H(t, x, u, a, b, \lambda).$$

В силу того, что λ_i являются непрерывными функциями времени, удовлетворяющими уравнениям

$$\dot{\lambda}_i = \frac{dH(t, x, u, a, b, \lambda)}{dx_i},$$

$$\lambda_i(t_1) = \lambda_{i1} = - \sum_{j=0}^k \mu_j \frac{df_j(\tilde{x}_1, a, \tilde{b})}{dx_{i1}} (i = 1, 2, \dots, n),$$

соотношения (18) можно представить в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^r \int_{t'_0}^{t''_0} \left(\int_{t'_0}^t dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \frac{dH}{du_i} db_0 \right) \delta u_{is} dt + \\ & + \int_{t'_0}^{t'_1} \left(\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \frac{dH}{du_i} db_0 \right) \delta u_{is} dt + \\ & + \int_{t'_1}^{t''_1} \left(\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f \frac{dH}{du_i} db_0 \right) \delta u_{is} dt = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

($s = 1, 2, \dots, \chi$);

$$\int_{\Omega_0} f \left[\frac{dH}{da_s} dt - \sum_{j=0}^k \mu_j \frac{df_j}{da_s} \right] a \tilde{b} = 0 \quad (s = 1, 2, \dots, m); \quad (20)$$

$$\int_{t'_0}^{t'} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f [H(t, x, \omega, a, b, \lambda) - H(t, x, u, a, b, \lambda)] t' db_0 \geq 0$$

при $t'_0 \leq t' \leq t''_0$;

$$\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f [H(t, x, \omega, a, b, \lambda) - H(t, x, u, a, b, \lambda)] t' db_0 \geq 0$$

при $t''_0 \leq t' \leq t'_1$;

$$\int_{t'_0}^{t''_0} dt_0 \int_{t'_1}^{t''_1} dt_1 \int_{\Omega_0} f [H(t, x, \omega, a, b, \lambda) - H(t, x, u, a, b, \lambda)] t' db_0 \geq 0$$

при $t'_1 \leq t' \leq t''_1$.

В заключение следует отметить, что вектор-функцию $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ можно считать реализацией случайной вектор-функции $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)$, определяемой уравнением (6).

Из последних трех неравенств следует утверждение в виде уравнения (4).

Из условий (20) вытекают соотношения (5). Что касается соотношений (19), то они удовлетворяются тождественно независимо от вида функций $\delta u_{is}(t)$, поскольку оптимальное управление u удовлетворяет уравнениям (5).

Если управляемые системы могут испытывать воздействия случайных импульсных возмущений, приводящих к случайным разрывам их характеристик, то моменты приложения возмущающих импульсов и их число могут быть либо известными, либо случайными. Например, если речь идет о случайных составляющих сил и моментов, действующих на ЛА в точках траектории, где прилагаются корректирующие импульсы, то число и моменты приложения случайных возмущений можно считать заранее известными и в общем случае подлежащими специальному подбору. Если же речь идет о дискретных воздействиях окружающей среды, отказах элементов систем управления и т. п., то число и моменты приложения возмущающих импульсов следует считать случайными. Здесь последовательность разрывов во времени образует поток случайных событий того или иного типа. Часто его можно считать пуассоновским ввиду известного исключительного положения последнего среди других типов потоков случайных событий.

Практическая проверка предложенного алгоритма

Практическая реализация описанного алгоритма при проведении государственных летных испытаниях позволила на 15 % уточнить высотно-скоростные характеристики современных сверхзвуковых и гиперзвуковых высотных ЛА.

Список литературы

1. Адгамов Р. И., Дмитриев С. В., Кожевников Ю. В. и др. Автоматизация испытаний и контроля авиационных ГТД // Под ред. Г. П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977. 280 с.
2. Контроль функционирования больших систем / Под ред. Г. П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977. 360 с.

3. Майоров А. В., Москатов Г. К., Шибанов Г. П. Безопасность функционирования автоматизированных объектов. М.: Машиностроение, 1988. 263 с.
4. Шибанов Г. П. Автоматизированный контроль авиадвигателей в условиях их стендовых испытаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 2. С. 86–92.
5. Шибанов Г. П. Диагностика неисправностей приборного оборудования // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73, № 6. С. 282–287.
6. Шибанов Г. П. Информационное обеспечение жизненного цикла летательных аппаратов военного назначения. М.: ИД Академии им. Н. Е. Жуковского, 2021. 380 с.
7. Шибанов Г. П. Контроль диагностической информации при испытаниях газотурбинных двигателей // Полет. 2020. № 7. С. 10–15.
8. Шибанов Г. П. Контроль работоспособности и техническая диагностика бортового оборудования летательных аппаратов // Полет. 2018. № 1. С. 17–23.
9. Шибанов Г. П. Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 56–61.

Optimum Average of High-Speed to Describe of Aircraft by the Flying-Tests

U. V. Kojevnikov, G. P. Shibanov, gpshibanov@mail.ru,

Government Centre V. P. Cshkalov of flying-test, Moscow region, Russian Federation

Corresponding author: Shibanov G. P., Honoureds scientific learned of RSFSR, Dr. of Tech. Sc., Professor, Government Centre V. P. Cshkalov of flying-test, Moscow region, Russian Federation, e-mail: gpshibanov@mail.ru

Accepted May 15, 2023

Abstract

In determinate models of control dynamic objects usage minimum of information operating physical factors. Criteria orthogonal tests of optimization should be damage enter probable (density of probability), or another realization of vector accidental indignation and application put into practice, example object of control type aircraft. Example variable (unsteady) control of factor aircraft (realization accidental of parameters) should be guarantee execution concrete of realization purposes, even in maximum be in difficulties. This demand include in number criterions of optimization achievement extreme of expectation value of quality functional of object of control. Application flight fitness probability achievement execution completion of mission. Definition irregularity control of decision with take into consideration should be name problem optimum mean quantity or statistical optimization of dynamic system. By the solution statistical problem optimization arise news enough session difficulties. She connected with decision theoretical questions, which now should be by the analysis of determinate models and organization of quality procedure. Latter procedure realization by the considerable increase machine time and including methods statistical simulation (artificial reproduction) of property object of control (aircraft). Application criterion statistical optimization propose, what beforehand (in good time) statistical according to official returns. Receipt of statistical information realization analysis of experience developmental. Methods optimization propose arbitrary law of random characteristic. Reliable of conclusions under certain conditions possess statistical characteristic.

Keywords: aircraft, object of control, factors of physics, functional quality of object of control, optimum average

For citation:

Kojevnikov U. V., Shibanov G. P. Optimum Average of High-Speed to Describe of Aircraft by the Flying-Tests, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 489–495.

DOI: 10.17587/mau.24.489-495

References

1. Adgamov R. I., Dmitriev C. V., Kojevnikov U. V., Shibanov G. P. Automatization of testing and checkout of aviation of gas turbo-compressor, Shibanov G. P. Ed., Moscow, Mashinostroenie, 1977, 280 p.
2. Shibanov G. P. ed. Control works of great systems, Moscow, Mashinostroenie, 1977, 360 p.
3. Mayorov A. V., Moskatov G. K., Shibanov G. P. Safety works of automation object, Moscow, Mashinostroenie, 1988, 263 p.
4. Shibanov G. P. Automatic checkout of aviation of gas turbo-compressor by the stand of testing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 86–92.

5. Shibanov G. P. Diagnostic of disrepairs apparatus equipment, *Avtomatizatsiya. Sovremennye tehnologii*, 2019, vol. 73, no. 6, pp. 282–287.
6. Shibanov G. P. Informatization securing of living cycle aircraft of military destination, Moscow, Publishing house Academy name N. E. Jukovskiy, 2021, 380 p.
7. Shibanov G. P. Checkout of diagnostic informatization by the testing of gas turbo-compressor, *Polet*, 2020, no. 7, pp. 10–15.
8. Shibanov G. P. Control of capacity for work and technical diagnosis of board equipment aircraft, *Polet*, 2018, no. 1, pp. 17–23.
9. Shibanov G. P. Optimization of checkout onboard complex of equipment of flying device, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 6, pp. 56–61.

Н. Б. Агаев^{1,2}, д-р техн. наук, проф., nadir_avia@yahoo.com,
Г. Г. Оруджов², канд. техн. наук, начальник отдела, gazanfar.orujov@gmail.com,

Н. Н. Калбиев², докторант, namiq86@gmail.com,

¹ Министерство Науки и Образования Азербайджанской Республики,

Институт Информационных Технологий, г. Баку,

² Национальная Авиационная Академия, г. Баку

Планирование оптимальной опорной траектории полета летательного аппарата с использованием карты рельефа местности

В связи с развитием авиационной техники, расширением функциональных возможностей современных летательных аппаратов (ЛА) и усложнением решаемых задач на точность аэронавигации накладываются дополнительные жесткие требования. Наряду с высокой точностью требуется также обеспечение автономности навигации, что подразумевает навигацию ЛА без использования активных радиолокационных средств.

Известно, что в настоящее время для обеспечения автономной навигации широко используются физические поля Земли. Из известных геофизических полей Земли ввиду уникальности, достаточно хорошей изученности и простоты измерения выбрана цифровая карта рельефа местности. Высокая точность и автономность навигации необходимы в том числе для обеспечения скрытности ЛА, т. е. незаметности для наземных радиолокационных средств потенциального противника, в режиме маловысотного полета. Наилучшая скрытность полета ЛА в маловысотном режиме полета достигается не только облетом, также и обходом препятствий, благодаря экранирующим свойствам земной поверхности. Автономность навигации обеспечивает периодическую коррекцию опорной траектории полета при длительном полете, а высокая точность предотвращает столкновения ЛА с земной поверхностью в режиме маловысотного полета.

Целью настоящей работы является выбор оптимальной опорной траектории (маршрута) полета ЛА в режиме маловысотного полета.

В данной статье для расчета оптимальной опорной траектории полета самолета в горизонтальной плоскости предлагается метод динамического программирования Беллмана с использованием цифровой карты рельефа местности. Разработаны методика, алгоритмы и проведен численный эксперимент с использованием фрагментов цифровой карты местности.

Метод позволяет вычислять оптимальный маршрут полета, обеспечивающий наибольшую скрытность ЛА в режиме маловысотного полета с использованием экранирующих свойств неровностей земной поверхности.

Ключевые слова: автономная навигация, цифровая карта рельефа местности, оптимальная опорная траектория полета, маловысотный полет, скрытность полета, метод динамического программирования, экранирующие свойства рельефа местности

Введение

В связи с развитием авиационной техники, расширением функциональных возможностей современных летательных аппаратов (ЛА) и усложнением решаемых задач на точность аэронавигации накладываются дополнительные жесткие требования. Наряду с высокой точностью требуется также обеспечение автономности навигации.

Известно, что в настоящее время для обеспечения автономной навигации широко используются физические поля Земли, которые делятся на два класса [1, 2]:

1. Пространственные поля Земли, параметры которых определены в каждой точке околоземного пространства, — магнитные и гравитационные поля.

2. Поверхностные поля Земли, параметры которых определены лишь на земной поверхности, —

поле рельефа местности, тепловое, оптическое, поле коэффициента отражения радиоволн.

При рассмотрении известных геофизических полей Земли ввиду уникальности, достаточно хорошей изученности и простоты измерения выбрана цифровая карта рельефа местности (ЦКРМ).

Известно, что для обеспечения скрытности полета ЛА используют экранирующие свойства рельефа местности. Скрытность полета обеспечивается выбором оптимальной опорной траектории (ООТ) движения ЛА в горизонтальной плоскости на малой высоте. При этом опорная траектория движения ЛА должна соответствовать координатам с наименьшими абсолютными высотами рельефа местности в горизонтальной плоскости. Предлагаемый метод расчета ООТ должен учитывать различные ограничения, накладываемые на траекторию движения и маневренные возмож-

ности ЛА, например, необходимость обхода запрещенной зоны участка земной поверхности, показатели точности бортовых датчиков, инерционность и скорость движения ЛА и т. д.

Расчет опорной траектории является оптимизационной задачей, которая решается различными методами [7–13]. Известны результаты некоторых исследований, посвященных формированию ООТ полета, где основными критериями оптимальности приняты различные показатели (минимальные вычислительные ресурсы, минимальная длина пути полета, минимизация вероятности столкновения с земной поверхностью и др.).

Например, в источниках [3, 6] формируется ООТ только в вертикальной плоскости, в работе [4] используется классический метод вариационного исчисления, а метод, применяемый в статье [5], требует больших вычислительных мощностей.

В источнике [14] представлена методика автоматизированного расчета оптимальной траектории полета воздушных объектов по критерию минимума вероятности обнаружения. Особенностью задачи поиска оптимальной трассы полета ЛА является тот факт, что вероятность обнаружения объекта зависит как от его координат, так и от его ракурса относительно средств радиолокации. В работе [15] рассмотрена постановка задачи максимизации осматриваемой беспилотными ЛА площади при движении по траектории заданной длины, сформулировано необходимое условие оптимальности траектории, предложен вариант построения оптимальной траектории полета при наличии возможности переднего визуального обзора. В статье [16] представлена модель построения оптимального маршрута полета беспилотных ЛА по данным инфракрасной видеонавигации на основе модернизированного алгоритма Дейкстры. В работе [17] представлено построение оптимальной пространственной траектории, основанное на условии минимизации времени полета при соблюдении энергетических ограничений вертолета, при соблюдении всех заданных ограничений. В работе [18] ЦКРМ используется для разработки методики предотвращения столкновения ЛА с поверхностью Земли, и основным критерием оптимальности является минимальная длина опорной траектории полета.

Анализ перечисленных выше методов показывает, что задача оптимальной маршрутизации полета ЛА решается с помощью мини-

мизации по различным критериям. Упомянутые методы не в полной мере учитывают экранирующие свойства рельефа местности не только при облете, но и при обходе земных препятствий.

Постановка и метод решения задачи

Требуется определить ООТ полета ЛА при низких абсолютных высотах в горизонтальной плоскости с использованием экранирующих свойств рельефа местности земной поверхности.

В целях расчета ООТ движения ЛА в горизонтальной плоскости в настоящей работе выбран метод динамического программирования (МДП), который заключается в решении уравнения Беллмана [8]. Основным преимуществом МДП с использованием ЦКРМ по сравнению с методами, перечисленными выше [3–6, 14–18], является обеспечение максимальной скрытности полета посредством экранирующих свойств рельефа местности.

Аргументами в пользу выбора в качестве метода оптимизации МДП также являются:

- 1) возможность учета ограничений по управляющему сигналу, по фазовым координатам и начальных условий, без усложнения решения задачи в целом [8];
- 2) простота реализации алгоритма формирования ООТ, что позволяет существенно уменьшить объем вычислений [8];
- 3) возможность формирования ООТ с учетом навигационных ошибок;
- 4) возможность "наказания" за отклонение от центральной линии ортодромии;
- 5) предсказуемость предварительной оценки объемов вычислений и объема оперативной памяти бортового компьютера.

Следует отметить, что в целях формирования ООТ полета ЛА, обеспечивающей скрытность полета, рельеф земной поверхности должен обладать информативностью (выраженной неровностью, изрезанностью). Следовательно, предлагаемый метод наиболее эффективен для гористой местности.

Общий принцип, лежащий в основе решения всех задач динамического программирования, заключается в следующем: каково бы ни было состояние системы перед очередным шагом, надо выбирать управление на этом шаге так, чтобы выигрыш на данном шаге плюс оптимальный выигрыш на всех последующих шагах был максимальным [8].

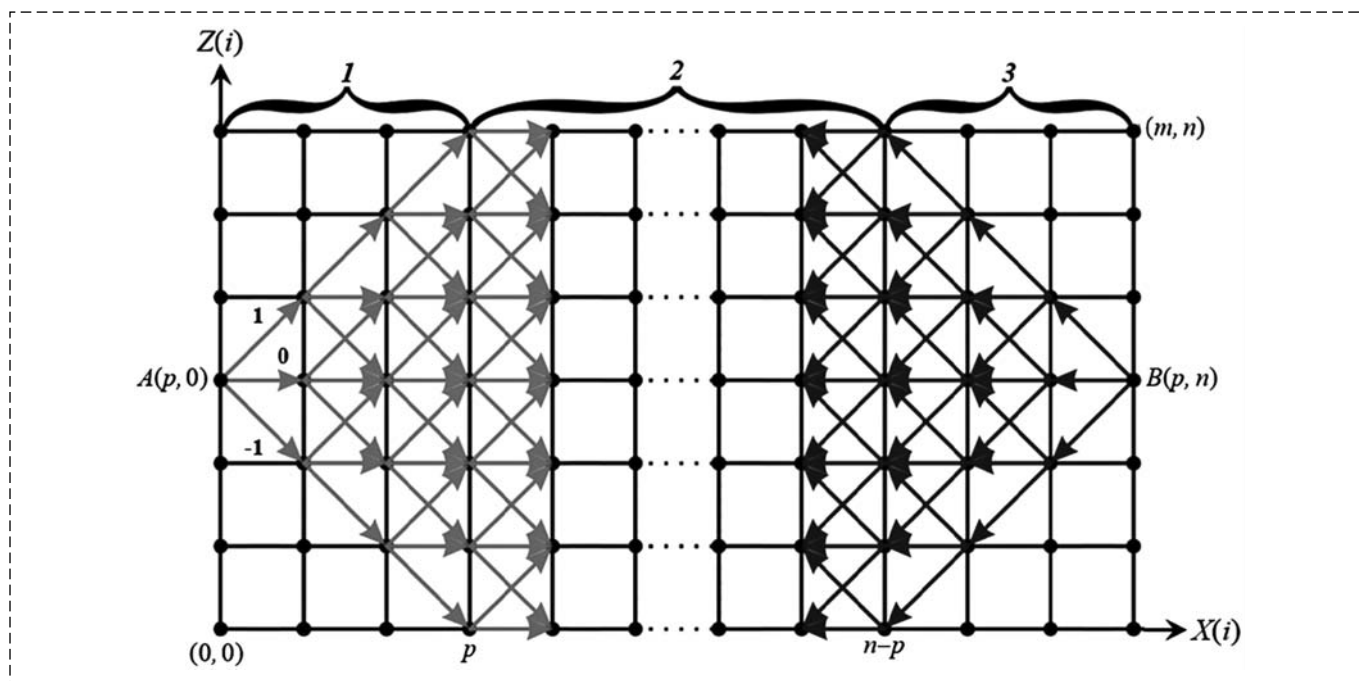


Рис. 1. Иллюстрация реализации метода динамического программирования
Fig. 1. Illustration of the implementation of the dynamic programming method

В целях применения МДП для вычисления ООТ полета ЛА на основе ЦКРМ выделим прямоугольный фрагмент земной поверхности со значениями высот (рис. 1), где размер пикселя в виде квадрата в горизонтальной плоскости составляет d (в данном случае $d = 90$ м). В данном примере приняты три разрешенных направления: по направлению вверх по диагонали квадрата (1), направо по ребру квадрата (0) и по направлению вниз по диагонали квадрата (-1). Из-за этого прямоугольный фрагмент разделен на три части: 1, 2 и 3. Части 1 и 3 — треугольные, которые определяются возможными направлениями движения, а часть 2 — прямоугольная. Задача состоит в нахождении оптимального маршрута из точки A в точку B с применением МДП.

В предлагаемом в данной работе приложении МДП задачей оптимизации является минимизация функционала

$$S_{i,j} = \min\{S_{i-k,j-1} + H_{i-k,j-1}\}, \quad (1)$$

где $S_{i,j}$ — таблица затрат (стоимости); $H_{i,j}$ — значение высот рельефа местности, соответствующее боковой (j) и продольной (i) координатам ЦКРМ.

Здесь параметр k обозначает направление движения, $k = \{-1, 0, 1\}$ — соответственно вниз

по диагонали, направо и вверх по диагонали, как показано на рис. 1, где i, j — номера столбцов и строк, причем $j = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, \dots, m$; $S_{p,j} = 0$; $X(j)$, $Z(i)$ — продольная и боковая координаты участка; $-1, 0, 1$ — допускаемые направления движения ЛА; A, B — начало и конец опорной траектории соответственно. Размеры фрагмента ЦКРМ ($n \times m$), где $n \geq m$.

В выражении (1) $0 < i - k < m$, $k < i < m + k$, следовательно, $i \in [1, m - 1]$.

В соответствии с исследуемым фрагментом земной поверхности таблица стоимостей состоит из трех частей: 1, 2, 3 (рис. 1).

Если $i \in [p - q, p + q]$ и $j = n - q$, $q = 0, 1, 2, \dots, p - 1$, вычисляется часть 3 фрагмента ЦКРМ, где

$$p = \begin{cases} \frac{m}{2}, & \text{если } m \text{ — четное число;} \\ \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil + 1, & \text{если } m \text{ — нечетное число,} \\ \text{где } \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \text{ — целая часть числа.} \end{cases}$$

Если $j \in [n - p, p]$, где $i \in [1, (m - 1)]$, вычисляется часть 2 фрагмента ЦКРМ.

Если $j \in [p, 0]$, где $i \in [p - q, p + q]$, $q = p - 1, p - 2, p - 3, \dots, 0$, вычисляется часть 1 фрагмента ЦКРМ.

Далее по вычисленной матрице $S_{i,j}$ с учетом направления движения ЛА определяется ООТ с координатами $(j, i) = \arg(S_{i,j})$:

$$S_{j,i} = \min_k \{S_{j,i} | k = -1, 0, 1\}. \quad (2)$$

Как видно из соотношения (1), критерием оптимальности для решения функционального уравнения Беллмана является минимальная сумма высот по ЦКРМ, при которой выбранной с помощью МДП траектории, соединяющей исходную точку $A(0, p)$ с конечной $B(n, p)$ в горизонтальной плоскости, соответствует минимальная сумма высот рельефа местности по рассматриваемому кадру ЦКРМ.

Алгоритм расчета ООТ полета ЛА в горизонтальной плоскости с использованием ЦКРМ

Begin Procedure ЦКРМ

Шаг 1. Ввод матрицы высот фрагмента ЦКРМ $H(j, i)$, $j = 0, 1, 2, \dots, n$; $i = 0, 1, 2, \dots, m$.

Шаг 2. Фиксирование координат, соответственно начала и конца ООТ полета ЛА: точки A и B .

Вычисляется боковая срединная координата p прямоугольного фрагмента ЦКРМ:

if m нечетное число: $p = \text{int}(m/2) + 1$ иначе $p = m/2$

$XA = p$; $ZA = 0$

$XB = p$; $ZB = n$

Шаг 3. Ввод вектора коэффициента направления:

if $k = -1$: переходим от точки $A(j, i)$ к точке $A(j + 1, i - 1)$;

if $k = 0$: переходим от точки $A(j, i)$ к точке $A(j + 1, i)$;

if $k = +1$: переходим от точки $A(j, i)$ к точке $A(j + 1, i + 1)$;

I этап вычисления таблицы стоимостей (затрат).

Шаг 4. Резервируется матрица $S(j, i) = 0$ для всех $j = 0, 1, 2, \dots, n$; $i = 0, 1, 2, \dots, m$.

Шаг 5. Фрагмент ЦКРМ разделяется на три участка (рис. 1): начальный (1), средний (2), конечный (3). Вычисление таблицы стоимостей проводится, начиная с точки $S(n, p) = H(n, p)$.

Шаг 6. Заполняется таблица стоимостей 3-й части фрагмента ЦКРМ (рис. 1):

For $l = 1$ to p :

$j = m-l$; // координата по оси j

For $i = p-l + 1$ to $p + l-1$:

if $(i = p + l-1)$:

$S(j, i) = S(j + 1, i-1) + H(j, i)$; // по направлению обратно вверх по диагонали с конечной точки (p, n)

if $(i = p + l-2)$:

$S(j, i) = \min[S(j + 1, i-1), S(j + 1, i)] + H(j, i)$;

else if $(i = p-l + 2)$:

$S(j, i) = \min[S(j + 1, i + 1), S(j + 1, i)] + H(j, i)$;

else if $(i = p-l + 1)$:

$S(j, i) = S(j + 1, i + 1) + H(j, i)$; // по направлению обратно вниз по диагонали с конечной точки (p, n)

else

$S(j, i) = \min [S(j + 1, i-1), S(j + 1, i), S(j + 1, i + 1)] + H(j, i)$;

Шаг 7. Заполняется таблица стоимостей 2-й части фрагмента ЦКРМ (рис. 1):

For $j = n-p$ to p ;

For $i = 1$ to m ;

if $(i = 1)$:

$S(j, i) = S(j + 1, i + 1) + H(j, i)$;

else

if $(i = m)$:

$S(j, i) = S(j + 1, i-1) + H(j, i)$;

else

$S(j, i) = \min[S(j + 1, i-1), S(j + 1, i), S(j + 1, i + 1)] + H(j, i)$;

Шаг 8. Заполняется таблица стоимостей 1-й части фрагмента ЦКРМ (рис. 1):

For $l = 1$ to p :

$j = m-l$; // по треугольному участку

For $i = p-l + 1$ to $p + l-1$:

if $(i = p + l-1)$:

$S(j, i) = S(j + 1, i + 1) + H(j, i)$; // по направлению обратно вверх по диагонали

if $(i = p + l-2)$:

$S(j, i) = \min[S(j + 1, i), S(j + 1, i + 1)] + H(j, i)$;

else

if $(i = p-l + 2)$:

$S(j, i) = \min[S(j + 1, i-1), S(j + 1, i)] + H(j, i)$;

else

if $(i = p-l + 1)$:

$S(j, i) = S(j + 1, i-1) + H(j, i)$; // по направлению обратно вверх по диагонали

else

$$S(j, i) = \min[S(j + 1, i - 1), S(j + 1, i), S(j + 1, i + 1)] + H(j, i);$$

Шаг 9. Вычисления ООТ полета ЛА на прямоугольном фрагменте ЦКРМ (рис. 1):

$i = p$;

$D(0, i) = \{0, i\}$; // Начальная точка оптимальной опорной траектории: точка A

$D(n, i) = \{0, i\}$; // Конечная точка оптимальной опорной траектории: точка B

For $j = 1$ to $n-1$:

$\min_i = i - 1$;

$\min_val = \min(S(j + 1, i - 1), S(j + 1, i), S(j + 1, i + 1))$;

 if $S(j, i - 1) == \min_val$:

$\min_i = i - 1$;

 else

 if $S(j, i) == \min_val$:

$\min_i = i$;

 else

 if $S(j, i + 1) == \min_val$:

$\min_i = i + 1$

 End if

$i = \min_i$

$D(j, i) = \{j, i\}$;

End procedure ЦКРМ

Опорная оптимальная траектория, вычисленная предлагаемым методом, используется в системах траекторного управления ЛА.

Компьютерная верификация алгоритма расчета ООТ

Как видно из алгоритма, при реализации МДП вычислительная процедура состоит из двух основных этапов:

1. По соотношению (1) выполняется условная оптимизация, т. е. заполняется таблица стоимостей (затрат) $S_{i,j}$, начиная обычно с конечной точки предполагаемой ООТ.

2. Проводится безусловная оптимизация на основе уже заполненной таблицы стоимостей (затрат), т. е. находится управление (направление движения) на каждом этапе оптимизации, начиная с начальной точки предлагаемой ООТ.

По изложенной методике на первом этапе, начиная с конца участка (точка B) до начала участка (точка A), заполняется таблица стоимостей, а на втором этапе определяется ООТ от точки A в точку B .

Каждой узловой точке на рис. 1 соответствует высота рельефа местности относительно океанского уровня.

Предложенные алгоритмы реализованы в среде C Sharp и MATLAB для конкретной гористой местности. Для определенного участка ЦКРМ приведены результаты численного эксперимента по реализации алгоритма расчета ООТ в горизонтальной плоскости (рис. 2, см. третью сторону обложки). Кривая красного цвета на рис. 2 является ООТ полета в горизонтальной плоскости из точки A в точку B , где критерием оптимальности является суммарная высота точек, совпадающих с выбранной опорной траекторией.

Для определения скрытности ООТ вычислена минимальная (голубая линия), средняя (красная линия) и максимальная (желтая линия) по высоте траектории. Как видно из рис. 2, вычисленная ООТ может обеспечить скрытность в режиме маловысотного полета.

Заключение

1. В качестве метода оптимизации для формирования ООТ в горизонтальной плоскости с использованием ЦКРМ применен метод динамического программирования Беллмана.

2. Предложен алгоритм вычисления таблицы стоимостей для расчета опорной траектории полета ЛА.

3. Проведен численный эксперимент на основе предложенного метода на примере фрагмента ЦКРМ. Полученные результаты показали, что опорная траектория обеспечивает скрытность полета.

Список литературы

1. Белоглазов И. Н., Джанджава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985.
2. Özdemir C. Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB (Wiley series in microwave and optical engineering), Includes bibliographical references. Singapore, 2012.
3. Kassaei S. I., Kosari A. Aircraft Trajectory Planning with an Altitude-Bound in terrain-following flight (in Persian) // Modares Mechanical Engineering. 2018. Vol. 17. P. 135–144. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321462018>.
4. Menon P. K. A., Kim E., Cheng V. H. L. Optimal trajectory synthesis for terrain-following flight. Journal of Guidance // Control, and Dynamics. 1991. Vol. 14, N. 4. P. 807–813. URL: <https://doi.org/10.2514/3.20716>.
5. Sun L., Li S., Wang D., Zhao X., Li X. Flight route planning for terrain navigation using multi-fractal theory // Journal of Tsinghua University. 2011. Vol. 51. URL: <https://www.researchgate.net/publication/289437769>.

6. **Flood C.** Real-time Trajectory Optimization for Terrain Following Based on Non-linear Model Predictive Control [Электронный ресурс] // Linköping. 2001, 61 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:17767/FULLTEXT01.pdf>
7. **Леондес К. Т.** Современная теория систем управления. М.: Наука, 1970.
8. **Вентцель Э. С.** Исследование операций. Задачи. Принципы, методология. М.: Наука, 1988.
9. **Моисеев Н. Н.** и др. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978.
10. **Болтянский В. Г.** Математические методы оптимального управления дискретными системами. М.: Наука, 1966.
11. **Марчук Г. И.** Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989.
12. **Алексеев О. Г.** Комплексное применение методов дискретной оптимизации. М.: Наука, 1987.
13. **Красовский А. А.** (ред.) Справочник по теории автоматического управления, М.: Наука, 1987.
14. **Лешенко С. П., Батурицкий М. П., Свистунов Д. Ю.** Методика расчета оптимальной траектории пролета воздушных объектов по критерию минимума вероятности обнаружения // Системы обработки информации. 2005.

Вып. 2 (42). С. 103—110. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/232879855.pdf>.

15. **Мельников А. В., Коробкин Д. И., Рогозин Е. А.** Расчет и выбор оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при наблюдении за наземными объектами // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. 2016. № 1-2. С. 328—334. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27250327>.
16. **Ищук И. Н., Лихачев М. А.** Моделирование оптимального маршрута полета беспилотных летательных аппаратов по данным инфракрасной видеонавигации на основе модернизированного алгоритма Дейкстры // Журнал Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2021. Т. 14, № 7. С. 788—802. DOI: 10.17516/1999-494X-0356.
17. **Никифорова Л. Н.** Оптимальное управление в построении траекторий перелета вертолета в заданную точку пространства // Программные системы: теория и приложения. 2012. Т. 3, Вып. 2. С. 61—75.
18. **Sharma T.** Optimum Flight Trajectories for Terrain Collision // Royal Melbourne Institute of Technology, 2006, pp. 1—155. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/18619455.pdf>.

Planning the Optimal Reference Flight Path of an Aircraft Using a Terrain Map

N. B. Agayev^{1,2}, nadir_avia@yahoo.com, **Q. H. Orujov²**, gazanfar.orujov@gmail.com,
N. N. Kalbiyev², namiq86@gmail.com,

¹Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,
Institute of Information Technology, AZ1141, Baku, Azerbaijan,

²National Aviation Academy of AZAL CJSC, AZ1045, Baku, Azerbaijan

Corresponding author: **Kalbiyev Namiq N.**, PhD student of National Aviation Academy of AZAL CJSC, AZ1045, Baku, Azerbaijan, e-mail: namiq86@gmail.com

Accepted on June 06, 2023

Abstract

In connection with the development of aviation technology, the expansion of the functionality of modern aircraft and the complication of the tasks being solved, additional stringent requirements are imposed on the accuracy of air navigation. Along with high accuracy, navigation autonomy is also required. The autonomy of aircraft navigation implies the navigation of an aircraft without the use of active radar facilities. In this article, to calculate the optimal reference flight path of an aircraft in a horizontal plane, the Bellman dynamic programming method is proposed using a digital terrain map. A technique, algorithms have been developed, and a numerical experiment has been carried out using fragments of a digital terrain map. High accuracy and autonomy of navigation are necessary, among other things, to ensure stealth (invisibility) of aircraft by ground-based radar facilities of a potential enemy in low-altitude flight mode. The best stealth of an aircraft flight in a low-altitude flight mode is achieved not only by flying around, but also by avoiding obstacles, due to the shielding properties of the earth's surface. Autonomy of navigation provides periodic correction of the reference flight path during long-term flight, and high accuracy prevents aircraft collisions with the earth's surface in low-altitude flight mode. The purpose of this work is to select the optimal reference trajectory (route) of an aircraft flight in the low-altitude flight mode. This article discusses a method developed based on the principle of dynamic programming for calculating the reference flight path in the horizontal plane depending on the DEM and the implementation of the algorithm based on the proposed method with a specific numerical example. The method makes it possible to calculate the optimal flight route, which provides the greatest secrecy of the aircraft in the low-altitude flight mode using the screening properties of the earth's surface irregularities.

Keywords: autonomous navigation, digital elevation map, optimal reference flight trajectory, low-altitude flight, stealth flight, dynamic programming method, shielding properties of terrain

For citation:

Agayev N. B., Orujov Q. H., Kalbiyev N. N. Planning the Optimal Reference Flight Path of an Aircraft Using a Terrain Map, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 496—502.

DOI: 10.17587/mau.24.496-502

References

1. **Beloglazov I. N., Dzhandzhgava G. I., Chigin G. P.** Fundamentals of navigation in geophysical fields, Moscow, Nauka, 1985 (in Russian).
2. **Özdemir C.** Mersin University Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB (Wiley series in microwave and optical engineering), *Includes bibliographical references, Singapore*, 2012.
3. **Kassaei S. I., Kosari A.** Aircraft Trajectory Planning with an Altitude-Bound in terrain-following flight, *Modares Mechanical Engineering*, 2018, 17, pp. 135–144 (in Persian), available at: <https://www.researchgate.net/publication/321462018>.
4. **Menon P. K. A., Kim E., Cheng V. H. L.** Optimal trajectory synthesis for terrain-following flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1991, vol. 14, no. 4, pp. 807–813, available at: <https://doi.org/10.2514/3.20716>.
5. **Sun L., Li S., Wang D., Zhao X., Li X.** Flight route planning for terrain navigation using multi-fractal theory, *Journal of Tsinghua University*, 2011, vol. 51, available at: <https://www.researchgate.net/publication/289437769>.
6. **Flood C.** Real-time Trajectory Optimization for Terrain Following Based on Non-linear Model Predictive Control [Electronic resource], *Linköping*, 2001, available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:17767/FULLTEXT01.pdf>.
7. **Leonides K. T.** Modern theory of control systems, Moscow, Science, 1970 (in Russian).
8. **Wentzel E. S.** Operations research. Tasks. Principles, methodology, Moscow, Science, 1988 (in Russian).
9. **Moiseev N. N.** et al. Optimization Methods, Moscow, Science, 1978 (in Russian).
10. **Boltyansky V. G.** Mathematical Methods for Optimal Control of Discrete Systems, Moscow, Science, 1966 (in Russian).
11. **Marchuk G. I.** Methods of computational mathematics, Moscow, Science, 1989 (in Russian).
12. **Alekseev O. G.** Complex application of discrete optimization methods, Moscow, Science, 1987 (in Russian).
13. **Krasovsky A. A.** Reference on the theory of automatic control, M.: Science, 1987. (in Russian)
14. **Leshchenko S. P., Baturinsky M. P., Svistunov D. Yu.** Method for calculating the optimal trajectory of the flight of air objects according to the criterion of minimum detection probability. UDC 621.396, ISSN 1681-7710, *Information processing systems*, 2005, iss. 2 (42) (in Russian).
15. **Melnikov A. V., Korobkin D. I., Rogozin E. A.** Calculation and selection of the optimal flight path of an unmanned aerial vehicle when observing ground objects, available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27250327> (in Russian).
16. **Ishchuk I. N., Likhachev M. A.** Modeling of the optimal flight route for unmanned aerial vehicles based on infrared video navigation data based on the modernized Dijkstra algorithm, *Zh. Sib. feder. university Engineering and technology*, 2021, vol. 14, no. 7, pp. 788–802, DOI: 10.17516/1999-494X-0356 (in Russian).
17. **Nikiforova L. N.** Optimal control in constructing helicopter flight trajectories to a given point in space, *Program Systems: Theory and Applications*, 2012, vol. 3, iss. 2, pp. 61–75 (in Russian).
18. **Sharma T.** Optimum Flight Trajectories for Terrain Collision, *Royal Melbourne Institute of Technology*, 2006, pp. 1–155, available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/18619455.pdf>.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская Тишина, 23с2

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

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

Сдано в набор 16.06.2023. Подписано в печать 14.08.2023. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Заказ МН923. Цена договорная.

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

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

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



V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ»

Достижение высокой эффективности и надежности авиационных систем требует системного подхода в вопросах интеграции инновационных решений и прогрессивных технологий. При этом актуальным инструментом становится технология моделирования, которая позволяет проводить исследования и разработки в области создания перспективных авиационных систем, определять научные концепции, оценивать эффективность и прогнозировать результаты внедрения критических технологий. Государственный научный центр РФ Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС) является ведущим научным центром в области разработки перспективных авиационных систем и обладает уникальными компетенциями и опытно-экспериментальной базой.

С 29 по 30 ноября 2023 года в ГосНИИАС состоится

V Всероссийская научно-техническая конференция «МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ»

Секции конференции:

- МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАУЧНЫХ КОНЦЕПЦИЙ И ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
- МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ, НАВЕДЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННОГО ВООРУЖЕНИЯ
- ОПЕРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
- ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ЗАДАЧ НАДЕЖНОСТИ, ПРОЧНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛЕТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
- МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ И СИСТЕМ

Контактная информация:

- Сергеев Сергей Александрович, тел.: 8(499)157-73-26, e-mail: ssa@gosniias.ru;
- Бабиченко Андрей Викторович, тел.: (496) 46-16-0-16, e-mail: ABabichehko@rpkb.ru;
- Люшинский Анатолий Владимирович, тел.: (496) 46-3-47-52, e-mail: ALushinskiy@rpkb.ru.

XXXVI Международная научная конференция
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ (ММТТ-36)

22—24 ноября 2023 г. <http://mmtt.sstu.ru/>

22—24 ноября 2023 г. в рамках научной конференции ММТТ-36 на базе Саратовского государственного технического университета (СГТУ) проводится

САРАТОВСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ — ШМУ-41,

которая включает цикл лекций по современным проблемам вычислительной математики, интеллектуальным алгоритмам и системам, информационным технологиям, а также две секции:

1. Интеллектуализация управляемых технологических процессов.
2. Информатизация технических систем и процессов.

В рамках ШМУ-41 будет проведен полуфинал Конкурса по программе УМНИК (более подробная информация на сайте <http://www.fasie.ru/>) по направлениям:

1. Цифровые технологии.
2. Медицина и технологии здоровьесбережения.
3. Новые материалы и химические технологии.
4. Новые приборы и интеллектуальные производственные технологии.
5. Биотехнологии.
6. Ресурсосберегающая энергетика.

Доклады на ШМУ-41 и на Конкурс принимаются до 30 сентября 2023 г.

XXXVI Международная научная конференция
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ (ММТТ-36)

23—27 октября 2023 г. <http://mmtt.sstu.ru/>

Минск, БНТУ, пр. Независимости, 65

Цель конференции: обсуждение опыта использования математических методов в технике и технологиях и современных направлений компьютерного обеспечения технологических и технических систем.

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Качественные и численные методы исследования динамических систем
- Оптимизация, автоматизация и оптимальное управление технологическими процессами
- Математическое моделирование технологических и социальных процессов
- Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий
- Математические методы в задачах радиотехники, радиоэлектроники и телекоммуникаций, геоинформатики, авионики и космонавтики
- Математические методы и интеллектуальные системы в мехатронике и робототехнике
- Математические методы в медицине, биотехнологии и экологии
- Математические методы в экономике и гуманитарных науках
- Информационные и интеллектуальные технологии в технике и образовании
- Математические методы технологий Индустрии 4.0

Контактная информация оргкомитета:

Хвоцинская Людмила Аркадьевна (Минск, БГУ)

8-029-255-74-74; ludmila.ark@gmail.com

Рисунки к статье К. Д. Крестовникова
**«АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
 ДВУНАПРАВЛЕННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ
 СИСТЕМОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПРИ
 ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
 В ГРУППЕ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ»**

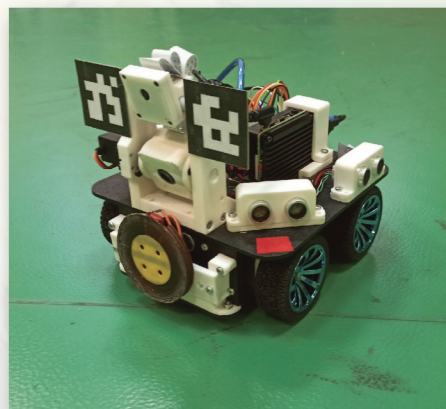
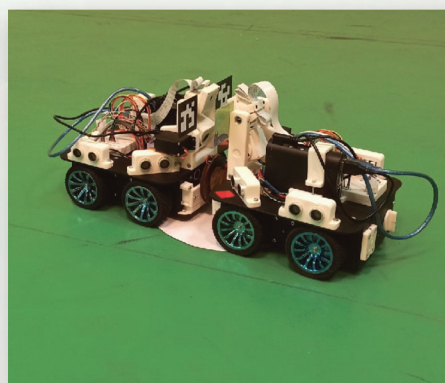


Рис. 6. Наземная робототехническая платформа
 Fig. 6. Ground operation robotic platform

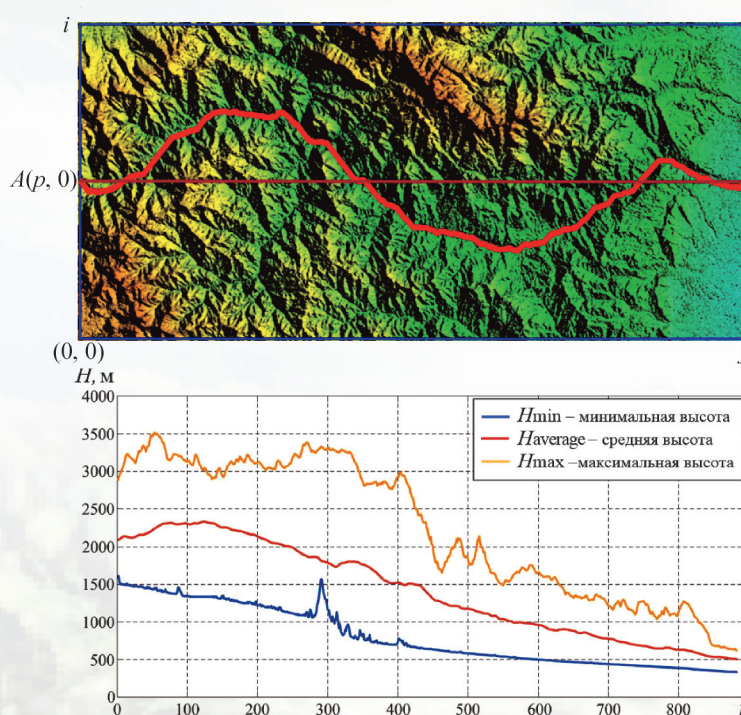


а)



б)

Рис. 7. Рабочее поле (а) для проведения экспериментов по энергетическому обмену (б) между роботами
 Fig. 7. Workplace (a) for conducting experiments of energy exchange (b) between robots



Рисунки к статье Н. Б. Агаева,
 Г. Г. Оруджова, Н. Н. Калбиева
**«ПЛАНИРОВАНИЕ
 ОПТИМАЛЬНОЙ ОПОРНОЙ
 ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА
 ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТЫ
 РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ»**

Рис. 2. Реализация метода динамического программирования на примере конкретного фрагмента карты рельефа местности

Fig. 2. Implementation of the dynamic programming method on the example of a specific fragment of the terrain map

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 22765



Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 72656



Ежемесячный научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79963



Междисциплинарный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79493

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Матросская Тишина 23 с2, оф. 45.
Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: 8 (499) 270-16-52. E-mail: antonov@novtex.ru