

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 19

2018

№ 9

Издается с ноября 2000 года

ISSN 1684-6427

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
МИКРИН Е. А., 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:

DANIELE Z., PhD, Италия
DORANTES D. J., PhD, Китай
GROUMPOS P. P., PhD, Греция
ISIDORI A., PhD, Италия
KATALINIC B., PhD, Австрия
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань
MASON O. J., PhD, Ирландия
ORTEGA R. S., PhD, Франция
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США
STRZELECKI R. M., PhD, Польша
SUBUDHI B. D., PhD, Индия
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан
ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина
ТРОФИМЕНКО Е. Е., д.т.н., Беларусь
БОБЦОВ А. А., д.т.н.
БУКОВ В. Н., д.т.н.
ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.
ЛОХИН В. М., д.т.н.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., 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.
ЮРЕВИЧ Е. И., д.т.н.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:
АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами 563
- Сухинин Б. В., Сурков В. В. К вопросу о методах АКОР и АКАР в задачах синтеза нелинейных систем управления 579
- Феофилов С. В., Козырь А. В. Анализ периодических движений в цифровых автоколебательных системах управления 287
- Хижняков Ю. Н., Южаков А. А., Сулимова Д. А. Модификация многорежимного управления воздушным реактивным двигателем 595
- Девятисильный А. С., Шурыгин А. В. Модели бортовой реконструкции параметров морского течения как навигационного фактора по данным ГЛОНАСС 601

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments 608
- Бобырь М. В., Дородных А. А., Якушев А. С. Устройство и программная модель управления пневматическим мехатронным комплексом 612
- Буканова Т. С., Алиев М. Т. Экспериментальное исследование электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением . 618

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 БД RSCI на платформе Web of Science.

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 19
2018
No. 9

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

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.

MIKRIN E. 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

DANIELE Z., PhD, Italy

DORANTES D. J., PhD, China

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

TROFIMENKO Ye. Ye., Belarus

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V. M.

PAVLOVSKY V. E.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

YUREVICH E. I.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

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

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational Approach in the Problems of Automation Control by Technical Objects 563

Sukhinin B. V., Surkov V. V. To the Question on the ADOR and the ADAR Methods in the Problems of Synthesis of Nonlinear Control Systems 579

Feofilov S. V., Kozyr A. V. Analysis of Periodic Motions in Digital Self-Oscillating Control Systems 587

Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A., Sulimova D. A. Modification of Multimode Control of an Air Jet Engine 595

Devyatitsilny A. S., Shurygin A. V. Models of Onboard Reconstruction of Sea Current Parameters as a Navigation Factor According to GLONASS Data 601

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Semenov E. A., Sukhanov A. N., Chashchukhin V. G. Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments 608

Bobyry M. V., Dorodnykh A. A., Yakushev A. S. Device and Program Model of Pneumatic Mechatronic Complex Control 612

Bukanova T. S., Aliev M. T. Pilot Study of the Electric Drive on the Basis of the Two-Rotor Electrical Machine with Differential Management 618

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

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@mail.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва,

Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,
МГУ им. М. В. Ломоносова; ИГУ им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Ситуационный подход в задачах автоматизации управления техническими объектами¹

Ситуационный подход, возникший первоначально в менеджменте в 60-е годы XX века, в настоящее время не получил должного развития и распространения в задачах управления техническими объектами. Истинные возможности ситуационного подхода в теоретической автоматике раскрываются при переосмыслении ключевых понятий "ситуация", "ситуационная модель" и "ситуационное управление" для класса сложных технических систем.

В статье обсуждается ретроспектива становления ситуационного подхода, вопросы применения ситуационной методологии в задачах автоматического управления и автоматизации эргатических систем управления.

Развиваемая авторами концепция ситуационного управления позволяет органично объединять методы логического и непрерывного динамического управления и может рассматриваться как одно из направлений развития теории логико-динамических систем. Это убедительно иллюстрируется применением ситуационной методологии в системах много-режимного регулирования — цель регулирования декомпозируется на локальные цели, которым отвечают определенные ситуации и режимы регулирования, а сами процессы регулирования реализуются посредством двухуровневой иерархической архитектуры системы: нижний уровень составляет банк субрегуляторов, обрабатывающих локальные цели, а на верхнем уровне осуществляется контроль текущих ситуаций и реализуется логический процесс переключения режимов.

Ситуационный подход может служить одной из фундаментальных основ пока еще не сложившейся теории управления сложными техническими объектами. Предлагаемая концепция ситуационно-целевого управления для данного класса объектов в отличие от классической двухступенчатой схемы "ситуация — действие" базируется на четырех-ступенчатой схеме "ситуация — цель — стратегия управления — действие", которая органично сочетается с много-целевым принципом управления сложными системами, основанным на разбиении главной цели на промежуточные локальные цели применительно к отдельным ситуациям. В итоге процесс управления реализуется совместно тремя функциями: мониторинга ситуаций, генерации локальных целей и формирования стратегии управления, выходом которых являются соответственно диагноз текущей ситуации, новая локальная цель управления в случае изменения ситуации и стратегия управления, направленная на достижение новой цели.

Ключевые слова: управление техническими объектами, ситуационный подход, ситуационно-целевое управление, ситуационные модели, многорежимное регулирование

XXI век имеет тенденцию к ситуационности и требует ситуационного мышления... Сверхзадача ситуационного подхода — научиться управлять ситуациями.

Н. М. Солодухо (Manifesto of Situational Movement)

Введение

Одним из перспективных методологических средств построения систем управления различного назначения является ситуационный подход [1], основанный на принятии решений и выработке управляющих воздействий в соответствии со сложившейся текущей ситуацией.

Методология ситуационного подхода включает тетраду: во-первых, выделение возможных типовых ситуаций в процессах управления; во-вторых, формирование набора соответствующих оптимальных стратегий управления; в-третьих, диагностику текущей ситуации; в-четвертых, выбор стратегии управления, оптимальной для данной ситуации.

Ситуационный подход, возникший первоначально в менеджменте в 60-е годы XX века [2],

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-08-00313.

в настоящее время находит применение в задачах принятия решений и процессах управления в социально-экономических, организационно-технических и производственно-хозяйственных системах [3–7].

Применение ситуационного подхода в задачах управления техническими объектами (ТО) позволяет строить эффективные алгоритмы управления с учетом априорных знаний о возможных типовых штатных и нештатных (критических и аварийных) ситуациях. Понятие "ситуация" используется в некоторых работах при решении задач управления роботами [8, 9] и БПЛА [10]. Однако ситуационный подход так и не получил должного развития и распространения как одна из фундаментальных основ теории управления сложными ТО. Здесь нельзя не согласиться с В. А. Виттихом, который предлагал [11] вернуться к понятию "ситуационное управление", введенному в 1971 г. независимо Моклером (R. J. Mockler) и Д. А. Поспеловым в работах [12, 13], имея в виду, что за прошедшие почти полвека их идеи так и не получили должного применения в теории и практике управления отчасти даже из-за отсутствия общепринятой трактовки понятия "ситуация". Кстати, данное понятие, являясь ключевым междисциплинарным, общенаучным средством познания, основой ситуационного познавательного подхода в различных областях научного знания [14], до сих пор остается методологически не проработанным [15]. Следует указать на многочисленные попытки восполнить данный пробел [16–21].

Важным классом современных ТО широкого назначения и большого разнообразия являются подвижные объекты (ПО) — наземные, морские, аэродинамические и космические объекты, оснащенные системами навигации и управления движением. Управление ПО может осуществляться как автономно, так и при участии человека-оператора. В связи с этим в системах управления ПО выделяются режимы автоматического и эргатического управления.

В статье обсуждается ретроспектива становления ситуационного подхода, современное состояние исследований в области ситуационного управления. Особое внимание уделяется развиваемой авторами концепции ситуационно-целевого управления ТО. Рассматриваются вопросы применения ситуационной методологии в задачах автоматизации управления ПО.

Генезис ситуационной методологии

Ситуационная методология имеет давнюю историю и берет свое начало в теоретическом менеджменте. Еще в начале 1920-х гг. известный социолог Фоллетт (M. P. Follett) сформулировала "закон ситуации", согласно которому действие управленца зависит от обладания им необходимыми знаниями, причем "различные ситуации требуют различных типов знаний".

Следует заметить, что в менеджменте первые идеи ситуационной методологии связывают с именем бизнесмена Деннисона (H. S. Dennison), утверждавшего, что полезность различных методов управления определяется именно конкретной управленческой ситуацией, причем "самым эффективным методом в каждой из ситуаций является тот, который ей наиболее соответствует". Укажем также на ситуационную модель лидерства под названием "путь — цель", разработанную известным психологом Фидлером (F. E. Fiedler) в середине 1950-х гг. и получившую развитие в работах Херси (P. Hersey) и Бланшара (K. Blanchard); Митчелла (T. R. Mitchel) и Хауса (R. J. House); Врума (V. H. Vroom), Яго (A. G. Jago) и Йеттона (P. W. Yetton). Согласно данной модели эффективность руководства зависит от конкретной ситуации: тип одного идеального лидера отсутствует, и для разных ситуаций требуются различные типы лидеров.

О ситуационном подходе к управлению упоминал еще в 1954 г. Друкер (P. F. Drucker) в книге "Практика управления", где он сформировал основные черты данного подхода, включая идею, в корне перевернувшую логику менеджмента: "управление должно начинаться с выработки целей и потом переходить к формированию функций, системы взаимодействия и процесса". В 1964 г. на конференции Американской академии менеджмента была принята резолюция о необходимости "создать единую теорию управления". В 1971 г. Моклером (R. J. Mockler) была провозглашена данная теория, названная *ситуационной теорией менеджмента*.

В кибернетических системах ситуационный подход впервые сформулировал в работах 1963–1969 гг. отец искусственного интеллекта Маккарти (J. McCarthy) [22, 23]. Он разработал способ описания модели мира и его изменений в рамках формализма математической логики и ввел понятие *ситуационного исчисления* (Situational Calculus) — формального аппарата для построения модели мира и выполнения

рассуждений о воздействиях на мир. Позднее были разработаны альтернативные подходы: ситуационное исчисление Рейтера (R. Reiter), исчисление событий Миллера (R. Miller) и Шенхема (M. Shanahan). Существенный вклад в развитие ситуационного подхода внесли работы отечественных ученых в начале 1970-х гг. Здесь необходимо выделить модельную теорию мышления В. Н. Пушкина, а также метод ситуационного моделирования Ю. И. Клыкова и Д. А. Поспелова [24, 25], которые легли в основу теории ситуационного управления большими системами [1, 26]. В кибернетике понятие *ситуационное управление* в научный оборот ввел в 1971 г. Д. А. Поспелов.

Ситуационный подход, в отличие от других, претендовавших на роль универсальных и "единственно верных", показывает, что лучшего способа управления нет в принципе: эффективность любого из них относительна и определяется текущей ситуацией. Его можно охарактеризовать как концепцию "управленческой относительности", резко контрастирующую с абсолютизмом многих иных подходов и их претензиями на универсальность. Не случайно переход от универсализма к ситуационизму сравнивают с переходом от плоскости к трехмерному пространству, от немого черно-белого кино к цветному со стереоскопическим звуком.

Концепция ситуационно-целевого управления

Успех ситуационного подхода в значительной мере зависит от правильной трактовки и точного определения ключевых факторов, влияющих на процесс управления. В концепции ситуационного управления такими базовыми понятиями являются *ситуация* и *ситуационная модель*.

Понятие *ситуация* используется довольно часто в самых разнообразных аспектах и порой неотделимо от таких понятий, как состояние, событие, процесс, положение и т. д. В ранних работах Ю. И. Клыкова и Д. А. Поспелова, а также в большинстве современных работ (см., например, [18]) ситуация явно отождествляется с состоянием управляемой системы. Позднее Д. А. Поспелов расширяет понятие ситуации, добавляя в него информацию о связях между объектами: "текущая ситуация — совокупность всех сведений о структуре объекта и его функционировании в данный момент времени". Кстати, многие специалисты в области менеджмента сначала были склонны рассматривать

ситуацию просто как "сочетание условий и обстоятельств, создающих определенную обстановку в данный момент времени". Позднее они расширили понятие ситуации, рассматривая ее как синоним слова взаимосвязь: ситуация есть совокупность состояний, действующих процессов и произошедших событий.

Понятие "ситуационная модель" дает формальное описание мира с помощью ситуаций, в которых предстоит действовать управляемому объекту. В данной модели учитываются те факторы, которые действительно влияют на развитие ситуаций. Сюда относятся релевантные характеристики объекта и внешнего мира: пространственное положение, режим и условия функционирования системы, ее техническое и динамическое состояние. Фактически ситуационную модель можно рассматривать как сценарий развития ситуации, в котором четко прописываются основные этапы и порядок их смены. В известных подходах к построению ситуационных моделей в качестве формального аппарата используются модели дискретно-событийного класса: сети Петри (предикативные, раскрашенные, иерархические), конечные автоматы; графы состояний и переходов.

Таким образом, в рамках классических представлений ситуация — это полное состояние мира в некоторый момент времени. Однако такая трактовка и соответствующая формализация понятия ситуации малопродуктивны для реальных задач управления объектами, поскольку они не учитывают действия различных факторов неопределенности (неполноты знаний о свойствах объекта, неточности информации о его динамике, недетерминированности окружающей среды).

Четырехступенчатая схема ситуационного управления. Классическое ситуационное управление как в менеджменте, так и в кибернетике основано на схеме "ситуация → действие", причем алгоритм управления явно не задается, а реализуется на ситуационной сети, под которой понимается ориентированный взвешенный граф переходов по эталонным ситуациям, определяемым исходной и целевой ситуациями. Дуги графа отражают смену ситуаций и вызывающие ее информационно-управляющие процессы. Заметим, что понятие дискретной сети проблемных ситуаций было введено В. Н. Пушкиным и Д. А. Поспеловым.

Авторами предложена и получила развитие новая концепция ситуационно-целевого управ-

ления² [27—32], которая в отличие от классической двухступенчатой схемы "ситуация → действие" базируется на четырехступенчатой схеме "ситуация → цель → стратегия управления → действие", представленной на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Ситуация рассматривается как совокупность некоторых условий, существенных для достижения цели. Данные условия формализуются средствами математической логики и включаются в структуру динамической базы знаний продукционного типа. В результате ситуационное пространство оказывается конечным и может быть представлено ситуационным графом. Такой подход лежит в основе развиваемого логико-динамического формализма ситуационно-целевого управления.

Согласно концепции ситуационно-целевого управления объектом каждая ситуация порождает локальную (рабочую) цель действий, для достижения которой формируется свой план действий, принимаемый к исполнению. Формируемые стратегии управления имеют дискретно-временную структуру и вследствие присущей им алгоритмической гибкости перспективны для реализации механизмов адаптации и самоорганизации в системах управления.

Следует особо подчеркнуть, что в концепции ситуационно-целевого управления ситуационный подход органично сочетается с многоцелевым принципом управления в сложных системах: главная цель системы разбивается на промежуточные подцели, которые формализуются как локальные (рабочие) цели применительно к отдельным ситуациям. В результате декомпозиции получается древовидная иерархическая структура системы целей, в которой каждая цель является агрегированной по отношению к подчиненным целям, имеющим более дифференцированное представление. В итоге процесс управления ориентирован на оценку ожидаемого развития ситуации, принятие решений и действия, ведущие к достижению локальных целей.

Ситуационно-целевое управление базируется на ситуационной модели и реализуется

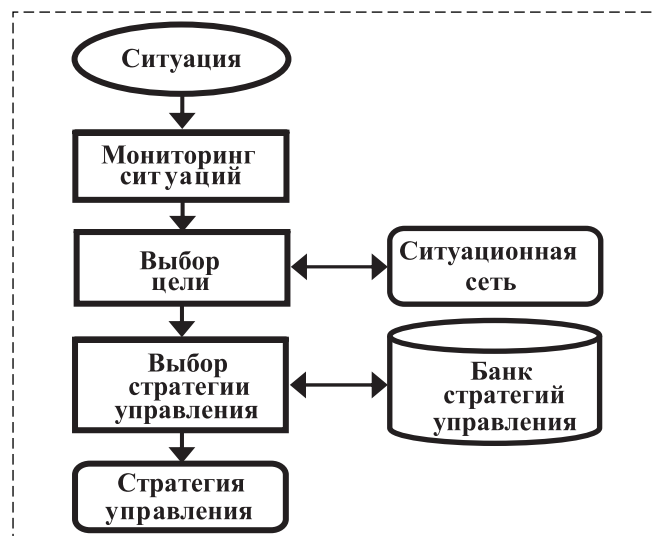


Рис. 2. Этапы процесса ситуационного управления

совместно тремя функциями: мониторинг ситуаций, генерация локальных целей и формирование стратегии управления, выходом которых являются соответственно диагноз текущей ситуации, новая локальная цель управления в случае изменения ситуации и стратегия управления, направленная на достижение новой цели. Процесс ситуационно-целевого управления представляет блок-схема на рис. 2, отражающая указанные три этапа: мониторинг ситуаций, выбор рабочей цели управления и выбор стратегии управления.

Предложенная концепция ситуационного управления характеризуется следующими базовыми положениями:

1. Ситуация не является совокупностью переменных состояния объекта и внешней среды, а идентифицирует некоторую область локализации динамических переменных. К примеру, при малых возмущениях текущего динамического режима состояние системы изменяется, а ситуация остается неизменной.

2. Каждая ситуация порождает локальную (рабочую) цель управления, для достижения которой формируется стратегия управления. Тем самым, ситуационное управление по своей структуре является дискретным.

3. Предлагается использовать классификационные схемы для ситуаций, в частности, выделять критические (предаварийные и аварийные) ситуации. На этой основе решается задача ситуационного мониторинга.

4. Предлагается ситуационный подход сочетать с многоцелевым принципом управления сложными системами: главная цель разбива-

² Укажем на плагиат в статье [Корнеев Н. В., Минитаева А. М. Человеко-машинный интерфейс как важнейший компонент архитектуры перспективных эргатических систем управления // Ученые записки РГСУ. 2012. № 7. С. 93—97]: в ней заимствованы ключевые положения данной концепции ситуационно-целевого управления без ссылок на первоисточники.

ется на подцели, которые формализуются как локальные цели управления применительно к отдельным ситуациям. В итоге формируемые стратегии являются прогностическими, учитывающими возможные сценарии ожидаемого будущего развития ситуации.

5. Излагаемая трактовка ситуации позволяет характеризовать и анализировать динамические процессы в объекте с учетом различных факторов неопределенности в динамике объекта и свойствах окружающей среды.

6. Ситуационное пространство динамических объектов является конечным и представляется ситуационным графом. Тем самым открывается возможность построения аппарата ситуационного исчисления и разработки логико-динамического формализма ситуационно-целевого управления.

Теоретико-множественная модель ситуационного пространства

Необходимой предпосылкой эффективности метода ситуационно-целевого управления является возможность различного уровня абстрагирования при построении ситуационных моделей реальных процессов. Формат определения ситуаций должен позволять гибко приспосабливать структуру применяемых ситуационных моделей к условиям задач управления. Такую возможность предоставляет описываемый ниже подход к формализации понятия ситуационного пространства, предложенный в работах авторов (см., например, [31, 32]), в котором определены операции агрегирования и дробления ситуаций.

Прежде всего, необходимо задать ситуационный *универсум* Ω — множество, элементы которого $\omega \in \Omega$ будем называть *элементарными ситуациями*. Конкретное ситуационное пространство S — это некоторое семейство подмножеств универсума:

$$S = \{s_i, i \in I\},$$

$s_i \subset \Omega$, являющееся покрытием Ω :

$$\bigcup_{i \in I} s_i = \Omega.$$

Элементы пространства S будем именовать *ситуациями*, следовательно, каждая ситуация $s \in S$ является суммой элементарных ситуаций $\omega \in \Omega$.

Таким образом, *ситуационное пространство* определяется парой (Ω, S) , т. е. носителем си-

туационного пространства Ω и семейством ситуаций S .

В рамках данных определений к ситуациям применимы обычные теоретико-множественные операции. Операция объединения приводит к агрегированию ситуаций, а операция разбиения множеств — к дроблению ситуаций. Так, для ряда задач необходимо, чтобы семейство подмножеств $\{s_i, i \in I\}$ было дизъюнктивным, т. е. чтобы его элементы попарно не пересекались:

$$\forall i, j \in I, i \neq j \Rightarrow s_i \cap s_j = \emptyset.$$

Такое ситуационное пространство S является *разбиением* Ω .

Положим, что к ситуационному пространству S , являющемуся разбиением Ω , добавлены новые множества, образованные посредством выполнения ряда операций объединения имеющихся множеств, и в результате получено *расширенное* ситуационное пространство $\hat{S}$. Оно является частично упорядоченным множеством, причем отношение частичного порядка в нем задается включением: $s_1 \supset s_2$. Такое пространство представимо корневым деревом — *деревом ситуаций*, определяющим иерархию ситуаций, которое оказывается весьма полезным конструктом при разработке алгоритмов ситуационного управления.

Древовидную структуру иерархии ситуаций можно представить так называемой моделью вложенных множеств (Nested Set Model), как показано на рис. 3 (см. вторую сторону обложки).

Операции агрегирования и иерархической структуризации ситуаций являются удобными инструментами, допускающими те же самые операции для аналогичной структуризации множества локальных целей управления.

Задача мониторинга ситуаций

Положим, что ситуация описывается набором признаков категориального типа

$$s = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m), \quad (1)$$

которые характеризуют состояние системы и внешней среды. Здесь $\theta_i \in \Theta_i$, где Θ_i — множество значений i -го признака.

Кортеж (1) является элементом ситуационного пространства:

$$S = \Theta_1 \times \Theta_2 \times \dots \times \Theta_m.$$

Под мониторингом ситуаций понимается диагностика и контроль текущих ситуаций по данным наблюдения. При алгоритмизации данных задач предлагается использовать применяемый в задачах интеллектуального анализа данных (Data Mining) аппарат деревьев решений.

Деревья решений (Decision Tree) — один из методов автоматической классификации объектов наблюдения, который позволяет представлять совокупность используемых в классификационной процедуре правил в виде иерархической, последовательной структуры. Узлы дерева представляют объекты анализа и момент выбора направления действий, ветви дерева изображают события, которые могут иметь место, а листья — альтернативные решения. Под правилом понимается логическая конструкция вида ЕСЛИ—ТО. Каждому из них соответствует внутренний узел дерева. Листьям (терминальным узлам, узлам решения) отвечают конкретные классы объектов.

Аппарат деревьев решений предлагается применять для классификации текущих ситуаций. В этом случае отдельные признаки θ_i в (1) принимаются в качестве *атрибутов расщепления* для строящегося дерева решений, так что по их значениям будет происходить ветвление.

Можно отметить выгоды применения деревьев решений: описание данных дается в компактной форме; имеется возможность использования механизмов обучения; простота формализации знаний; интуитивно понятная классификационная модель.

Предлагаются два способа применений деревьев решений в системах управления. Во-первых, это иерархическая декомпозиция целей управления: глобальная цель системы представляется деревом локальных целей. Во-вторых, деревья решений удобны для реализации механизмов логического вывода и формализации базы знаний продукционного типа.

Ситуационная методология в задачах автоматического управления

Ситуационный подход является весьма перспективным методологическим средством построения систем автоматического управления (САУ) [31].

Рассматривая задачи автоматизации управления ТО, будем полагать, что САУ выполняет некоторые *действия* (механические движения) во

внешней среде в соответствии со своим целевым назначением. Ситуационный подход предназначен для описания функционирования САУ в изменчивом мире и исходит из того, что в условиях действия многообразия факторов самой эффективной стратегией в конкретной ситуации является та, которая, во-первых, более всего соответствует данной ситуации и, во-вторых, является прогностической, т. е. учитывает возможные сценарии будущего развития ситуации.

Ситуационный подход применительно к автоматическим системам воплощает схема *ситуационно-целевого управления*, представленная на рис. 4.

Здесь САУ имеет двухуровневую иерархическую структуру. На нижнем уровне выполняются базовые функции обработки информации и управления. Последние в аппаратном слое системы реализуют функции интерфейса с внешним миром.

Верхний уровень реализует следующие функции:

- мониторинг ситуаций;
- генерация рабочей цели управления согласно текущей ситуации;
- планирование действий для достижения рабочей цели;
- исполнение плана.

Центральное место в реализации данных функций занимают ситуационные модели функционирования САУ.

Ситуационное управление многорежимными процессами. Многорежимность является одним



Рис. 4. Схема ситуационно-целевого управления

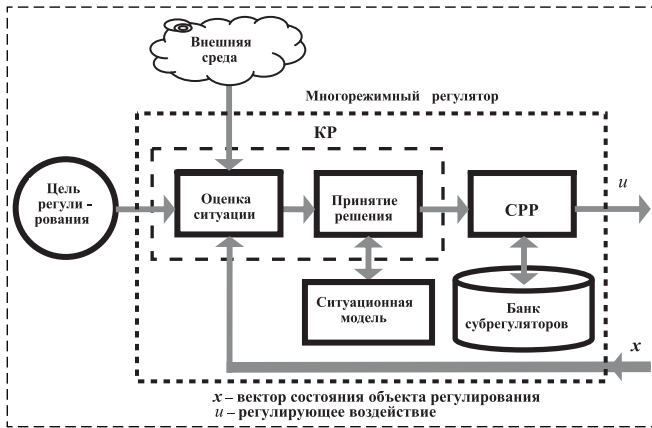


Рис. 5. Функциональная схема многорежимного регулятора

из важнейших способов повышения функциональной гибкости и эффективности систем управления [33]. Декомпозиция процесса управления на режимы позволяет учесть многообразие условий функционирования системы. Кроме этого, появляется возможность структурной перестройки ее функционирования: режимы могут добавляться, ликвидироваться, расщепляться, объединяться, модифицироваться.

Предлагается двухуровневая архитектура многорежимных систем автоматического регулирования (САР): на верхнем уровне действует *контроллер режимов* (КР), а на нижнем — *субрегуляторы режимов* (СРР). За основу построения КР может быть принята схема ситуационно-целевого управления, представленная на рис. 4, функциональность которой должна быть модифицирована с учетом многорежимной структуры процессов регулирования, причем отдельные режимы реализуются соответствующими сепаратными СРР.

Структура многорежимного регулятора, построенного на основе ситуационной методологии, представлена на рис. 5. Здесь на основе сенсорной информации проводится оценка текущей ситуации, в блоке принятия решений определяется локальная цель регулирования и выбирается соответствующий алгоритм регулирования из банка СРР. Каждый СРР реализует желаемую динамику замкнутого контура регулирования в соответствии с заданной локальной целью.

Ситуационные модели процессов автоматического управления

Ситуационное управление базируется на *ситуационной модели*, дающей формальное описание условий функционирования процесса

управления с помощью ситуаций и учитывающей многообразие всех контролируемых факторов, влияющих на данный процесс.

Ограничимся рассмотрением вопросов применения ситуационного подхода для построения *автоматных моделей* процессов управления ПО.

Автомат выполняет определенные действия $a \in A$ в зависимости от текущей ситуации. Здесь A — множество всех возможных действий.

Простейшая ситуационная модель, по существу, является базой знаний о требуемом поведении автомата, является статической и строится на основе продукций "ситуация—действие" вида:

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } (\theta_1 = \theta_1^{(v)}) \wedge (\theta_2 = \theta_2^{(v)}) \wedge \dots \wedge (\theta_m = \theta_m^{(v)}), \\ \text{ТО } a = a^{(v)} \quad (v = \overline{1, N}). \end{aligned}$$

Увеличение числа антецедентов m и продукций N существенно усложняет построение и верификацию такой модели. В связи с этим целесообразна ее модификация на базе аппарата деревьев решений.

Для планирования возможных сценариев развития ситуаций необходима *динамическая* ситуационная модель, дополненная событийным механизмом описания действия внешней среды. В наиболее общем виде такая модель может быть представлена в виде *ситуационного графа*

$$G = (S, E),$$

под которым понимается ориентированный взвешенный граф, узлы которого $s \in S$ представляют возможные ситуации, а дуги $e \in E$ отражают смену ситуаций вследствие наступления тех или иных событий.

Пространство событий

$$E = E_0 \cup E_C,$$

где E_0 и E_C — множества неконтролируемых и управляемых событий. События первого типа могут происходить как во внешней среде, так и внутри системы, а события второго типа обусловлены активностью самой системы.

Важно отметить, что здесь алгоритмы управления явно не задаются, а реализуются в виде задач маршрутизации на ситуационном графе.

Ситуационная модель на базе сетей Петри.

Один из возможных вариантов развития ситуационного подхода — формализация динамических ситуационных моделей посредством аппарата сетей Петри.

Сеть Петри определяется кортежем

$$N = \langle P, T, F, \mu_0 \rangle,$$

где

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ — множество позиций;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ — множество переходов;
- $F = (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow Z_+ = \{0, 1, 2, \dots\}$ — функция инцидентности;
- $\mu_0: P \rightarrow Z_+$ — начальная маркировка сети.

Последовательность срабатываний переходов $\tau = t_1, t_2, \dots, t_l$ задает динамику сети Петри: $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_l$.

Динамическая модель системы получается на основе интерпретации позиций p как ситуаций, а переходов t — как событий, инициирующих изменения ситуаций.

Ситуационная модель на базе сетей фреймов. В качестве одного из способов формализации ситуационных моделей предлагается аппарат фреймовых сетей.

Фреймовая модель, основанная на теории М. Минского, представляет собой систематизированную в виде единой теории технологическую модель памяти человека и его сознания. Фрейм — структура данных для представления некоторого концептуального объекта. Относящаяся к фрейму информация содержится в его компонентах — слотах.

Так, фрейм ТЕКУЩАЯ СИТУАЦИЯ должен иметь следующие слоты:

- состояние автомата;
- состояние среды;
- глобальная цель;
- текущая локальная цель;
- новая локальная цель;
- стратегия управления.

В отличие от моделей других типов во фреймовых моделях фиксируется жесткая структура, которая называется фреймом-прототипом, или образцом.

Значением слота могут быть данные различных типов. В частности, это могут быть наборы слотов более низкого уровня. В качестве значения слота может выступать имя другого фрейма — так образуются сети фреймов. Все фреймы взаимосвязаны и образуют единую фреймовую структуру, в которой органически объединены декларативные и процедурные знания. Это дает возможность композиции и декомпозиции информационных структур.

Фреймовые модели являются достаточно универсальными, поскольку позволяют отобразить все многообразие знаний о мире через фреймы-структуры для обозначений объектов и понятий (цель); фреймы-роли (оператор);

фреймы-сценарии (режим движения); фреймы-ситуации (авария, штатный режим).

Ситуационная процессная модель. Необходимость учета внутреннего состояния автомата приводит к усложнению ситуационных моделей. Соответствующий класс моделей может быть представлен в форме разностных уравнений вида

$$x(t+1) = \lambda(x(t), s(t), a(t)), \quad (2)$$

$$w(t+1) = \mu(w(t), e(t), a(t)), \quad (3)$$

$$s(t) = \sigma(x(t), w(t)), \quad (4)$$

$$a(t) = \delta(s(t)), \quad (5)$$

где $x \in X$ — состояние автомата; $w \in W$ — состояние внешней среды; $e \in E_0$ — событие во внешней среде; $s \in S$ — ситуация; $a \in A$ — действие; $\lambda: X \times S \times A \rightarrow X$; $\mu: W \times E_0 \times A \rightarrow S$; $\sigma: X \times W \rightarrow S$; $\delta: S \rightarrow A$.

Уравнение (4) описывает структуру ситуации, а (5) — закон формирования действий. Если множества X и W конечны, то модель (2)–(5) является конечно-автоматной, причем факторы неопределенности в ней могут быть формализованы конструкциями недетерминированных автоматов.

Динамические процессы (2)–(5) протекают в абстрактном времени $t \in \{0, 1, 2, \dots, T-1\}$ и определяются следующими факторами:

- 1) начальными условиями $x(0), w(0)$;
- 2) происходящими событиями $e(0), e(1), e(2), \dots$;
- 3) выполняемыми действиями $a(0), a(1), a(2), \dots$.

Введем комплекс действий, совершенных к моменту времени $t > 0$:

$$\alpha(t) = \{a(0), a(1), \dots, a(t-1)\}.$$

Положим, главная цель выражена некоторым предикатом:

$$P(s(T)). \quad (6)$$

Однако ей могут отвечать различные стратегии действий, и тогда необходимо также учитывать стоимость достижения конечного результата. Положим, что такая стоимость оценивается некоторым критерием $Q: A^T \rightarrow \mathbf{R}_+ = [0, \infty)$. Тогда функционирование автомата наряду с терминальным требованием (6) следует подчинить требованию оптимальности:

$$Q(\alpha(T)) \rightarrow \min.$$

Планирование действий основано на анализе возможных сценариев будущего разви-

тия ситуаций в пределах некоторого горизонта планирования. Главная цель (6) разбивается на локальные (рабочие) подцели как транзитные ситуации. Если фактическая ситуация отличается от запланированной (вследствие действия неконтролируемых событий), то автоматом осуществляется новый акт планирования действий.

Ситуационная методология в задачах эргатического управления подвижными объектами

Ситуационный подход является весьма перспективным методологическим средством построения современных эргатических систем управления (ЭСУ) ПО, представляющих собой человеко-машинные системы [34—38], в которых человек-оператор (ЧО) является субъектом управления, взаимодействующим с техническими средствами, выполняющим функции целеполагающего характера и осуществляющим управление движением ПО.

Общую тенденцию развития ЭСУ ПО характеризуют следующие факторы: возрастание степени сложности задач управления, повышение степени потенциальной опасности внешней среды, рост объема обрабатываемой информации, сокращение времени на принятие решений, возрастание цены ошибок, правильности и качества принимаемых оперативных решений и др. Работа ЧО в этих условиях чревата *сенсорными, эмоциональными и интеллектуальными перегрузками* [39—42]. В связи с этим необходима новая идеология автоматизации ЭСУ ПО, ориентированная на оптимальное распределение функций между оператором и автоматикой.

Структура, режимы и степени автоматизации ЭСУ ПО. Функциональная структура ЭСУ ПО [27, 30, 32] схематично представлена на рис. 6 (см. вторую сторону обложки). Здесь средства автоматизации реализуют процессы обработки информации, контроля и управления. ЧО воспринимает и перерабатывает инструментальную, получаемую от средств отображения информации, и неинструментальную, получаемую от рецепторов органов чувств, информацию о внешней среде. Человеко-машинный интерфейс, образованный средствами отображения информации и органами управления, обеспечивает взаимодействие ЧО с автоматикой.

В процессе деятельности ЧО выполняет следующие функции: сенсорные — прием информации, интеллектуальные — восприятие,

оценка и переработка информации, волевые — принятие решения, эффекторные — реализация решения. Психика, психические процессы являются регуляторами деятельности, посредством которых оператор направляет, контролирует и корректирует свои действия в соответствии с поставленной целью.

Важнейшим свойством ЭСУ ПО является *многорежимность*. В зависимости от степени автоматизации возможны различные режимы управления движением: *ручное* (осуществляемое непосредственно оператором), *полуавтоматическое* (осуществляемое автоматикой с участием оператора), *автоматическое* (осуществляемое автоматикой без участия оператора). При этом различают режимы директорного, комбинированного и совмещенного управления. В режиме *директорного* управления ЧО включен в замкнутый контур управления и осуществляет управление по директорному сигналу, выдаваемому на средства отображения информации. В режиме *совмещенного* управления чередуются режимы ручного и автоматического управления, а в режиме *комбинированного* управления взаимодействуют замкнутые контуры директорного (или ручного) управления и автоматического управления: здесь возможно замыкание только одного из этих контуров или суммирование воздействий ЧО и автоматики.

В условиях компьютеризации ЭСУ ПО необходимо учитывать два способа участия ЧО в процессах автоматизированного управления — *диалоговый* (интерактивный) и *супервизорный* режимы: в первом случае осуществляется непосредственное взаимодействие оператора и автоматики, а во втором оператор осуществляет наблюдение за работой автоматики и ограничивается лишь оперативным вмешательством в целях ее коррекции.

Иерархия функциональных задач ЭСУ ПО. Эффективное решение задач автоматизации ЭСУ ПО возможно лишь в рамках комплексного интегрированного подхода, связанного с кардинальным изменением функциональной структуры системы — расширением и качественным изменением состава автоматизируемых функций.

На рис. 7 представлена предложенная авторами иерархическая трехуровневая функциональная схема ЭСУ ПО [27, 30, 32], воплощающая концепцию ситуационно-целевого управления.

Здесь на верхнем уровне планируются сценарии выполнения задания, на среднем, алгоритмическом, уровне осуществляются функции

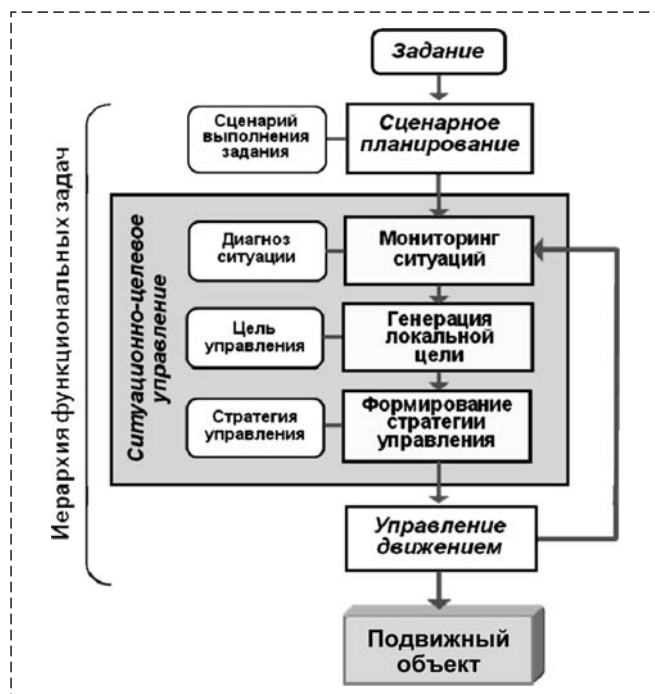


Рис. 7. Иерархическая трехуровневая функциональная схема ЭСУ ПО

ситуационно-целевого управления, на нижнем, аппаратном, уровне средствами локальной автоматики вырабатываются управляющие воздействия на объект, обеспечивающие управление его движением. Следует отметить, что нижний уровень функциональной иерархии ЭСУ ПО представляет аппаратный слой системы. Здесь осуществляются процессы ввода-вывода сигналов, реализуются конкретные *действия* на объект в соответствии со сформированной стратегией управления, причем применяются системотехнические решения классической автоматики.

В результате процесс ситуационно-целевого управления сводится к решению последовательной цепочки следующих задач:

- планирование;
- мониторинг ситуаций;
- генерация локальных целей;
- формирование стратегии управления;
- управление движением.

Функционирование ЭСУ ПО подчиняется конкретному *заданию*, которое определяет оперативную цель действий системы.

При выполнении системой задания ЧО руководствуется некоторым оперативным планом действий, который следует относить к **сценарному планированию** — разработке альтернативных сценариев будущего и созданию на их основе гибких оперативных планов действий.

Под сценарием понимается упорядоченная последовательность сцен, которые определяются стереотипной ситуацией, сложившейся вследствие наступления некоторого набора событий, и действиями в данной ситуации. Сценарий разворачивается в процессе функционирования системы, причем все альтернативные сценарии формируются на основе исследования окружающей среды (наличие predetermined элементов, ключевых неопределенностей и их комбинации). Сценарное планирование рассматривает все сценарии как одинаково возможные в будущем и придает гибкость стратегиям управления, помогая сократить время реагирования на изменение ситуаций.

Сценарные модели, по сути, являются одним из способов представления знаний. Используемые нами понятия сценария и сценарного планирования близки по смыслу к тем, которые используются в когнитивной психологии и стратегическом менеджменте. Когнитивная теория сценариев разработана Шенком (R. C. Schank) и Абельсоном (R. P. Abelson), а сценарное планирование разработано выдающимся футурологом XX столетия Каном (H. Kahn).

Сценарное планирование является новой методологией, требующей разработки адекватного математического аппарата и технологического инструментария. Представляют интерес три направления исследований в этой области:

- 1) графовое моделирование сценариев;
- 2) вербализация моделей сценария (компьютеризация вербального уровня описания сцен, лингвистические алгоритмы как словесное описание ситуаций, целей и способов управления);
- 3) применение аппарата нечеткой логики.

Отработка плана осуществляется контуром **ситуационно-целевого управления**, который реализуется алгоритмически (в результате человеко-машинного взаимодействия) и сводится к последовательному выполнению следующих трех функций: мониторинг ситуаций; генерация локальной цели управления; формирование стратегии управления. Здесь базисным является понятие *ситуации* — конкретного набора событий, обстоятельств и условий, которые влияют на систему в данное конкретное время. Все три задачи ситуационно-целевого управления вытекают из логики отработки сценария. Решением данных задач являются соответственно диагноз текущей ситуации, новая локальная цель управления (в случае изменения ситуации) и стратегия управления, направленная на ее достижение.

Уровень *управления движением* ПО является нижним уровнем функциональной иерархии ЭСУ и реализует стратегии управления, сформированные на верхних уровнях, в автоматическом или автоматизированном (диалоговом или супервизорном) режимах.

Средний и верхний уровни направлены на автоматизацию эргатических функций, и их проектирование выходит за рамки традиционных схем автоматизации. Ключевую роль в автоматизации ЭСУ ПО играет средний иерархический уровень — уровень ситуационно-целевого управления.

Ситуационная модель действий человека оператора

Динамические модели оператора являются важной составляющей теоретического базиса автоматизации ЭСУ. В особенности это касается режимов ручного и полуавтоматического управления самолетами.

Модель действий оператора. Возможны различные подходы к построению модели действий оператора (МДО) в ЭСУ ПО. Состав и характер выполняемых оператором функций определяется целевым назначением и степенью автоматизации ЭСУ.

Классический подход к проблеме построения МДО основан на методологии теории автоматического управления и заключается в представлении ЧО динамическим звеном в контуре ручного управления движением. Его теоретические основы были заложены в работах Макруера (D. Mcruer), Гесса (R. A. Hess), В. А. Боднера, Г. П. Шибанова, М. М. Сильвестрова, Г. Г. Себрякова и др. (см., например, [27, 37—43]), посвященных анализу процессов ручного управления в ЭСУ пилотируемых летательных аппаратов. Данный тип моделей отражает психомоторику ЧО при решении непрерывных перцептивно-моторных задач и применим лишь к процессам ручного регулирования и слежения. Однако при проектировании ЭСУ ПО необходимо учитывать и другие функции, выполняемые ЧО. Здесь уместно процитировать А. А. Красовского, который особо подчеркивал, что несмотря на обилие публикаций, посвященных данной проблеме, "достаточно универсальных и эффективных (адекватных) МДО пока не создано".

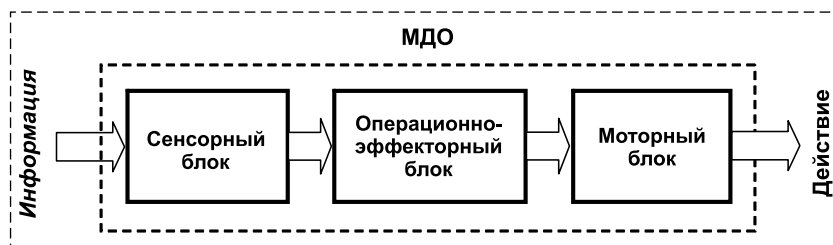


Рис. 8. Структура модели действий оператора

Ситуационный подход позволяет учесть многообразие условий функционирования ЭСУ и создает единую теоретическую базу для решения ключевых задач эргономического анализа и проектирования деятельности ЧО.

Более совершенные МДО должны описывать последовательность трех связанных процессов: восприятие информации, ее операционную переработку и выполнение действий. В соответствии с этим предлагается в структуре МДО выделять сенсорный, операционно-эффекторный и моторный блоки, как показано на рис. 8.

Данную структуру можно рассматривать как результат упрощения операционной архитектуры функциональных систем П. К. Анохина [44, с. 92—94]. В операционно-эффекторном блоке осуществляются процессы принятия решения, формирования акцептора результатов действия и эфферентной программы самого действия.

Достаточно полная МДО должна учитывать следующие факторы:

- психофизиологические возможности ЧО;
- механизмы распознавания ситуации и принятия решения;
- адаптационные свойства ЧО;
- дискретно-динамический механизм реакций ЧО;
- терминальный характер задач управления;
- способность ЧО к предвидению (перспективной экстраполяции) управляемых процессов;
- многорежимную структуру процессов ручного управления.

Механизмы действия перечисленных факторов связаны с операционно-эффекторным блоком. Ясно, что данный блок должен иметь сложную функционально-алгоритмическую структуру.

Поясним последний из перечисленных факторов — многорежимность модели поведения оператора. Эмпирические наблюдения показывают несостоятельность МДО как функционального преобразователя, динамического или

корректирующего звена с жесткой структурой. На самом деле процесс отработки оператором командных сигналов складывается из ряда последовательных режимов: "переходного", "доводки" и "стабилизации", для каждого из которых поведение ЧО кардинально различаются. Можно предположить, что в первом режиме управление является позиционно-программным, во втором имеет итерационный характер, а в третьем достигается астатический эффект, причем, скорее всего, за счет автоколебательных процессов.

Свойство многорежимности удастся формализовать в рамках предложенной авторами ситуационно-динамической концепции моделирования действий ЧО. Данная модель имеет двухуровневую иерархическую структуру. На верхнем уровне моделируется оценка внешних ситуаций со стороны оператора, а на нижнем — алгоритм его поведения в текущих ситуациях.

Учет многоплановых свойств ЧО возможен лишь в рамках комплексного подхода, аккумулирующего достижения в областях системного анализа, моделирования, систем искусственного интеллекта, когнитивной и инженерной психологии.

В описанной выше трехуровневой архитектуре ЭСУ ПО (см. рис. 7) два нижних уровня связаны с когнитивными процессами в деятельности ЧО. В связи с этим при разработке МДО принимаются следующие положения: 1) оператору как активному звену ЭСУ присущи функции целеполагания и планирования; 2) процессы управления ПО имеют многорежимную структуру; 3) оператор осуществляет ситуационное управление режимами движения ПО.

Обработка информации ЧО в ЭСУ ПО осуществляется в интерактивном режиме на основе *информационной модели* ПО и внешней среды (ВС). При этом оператор воспринимает ограниченное количество оперативной информации и руководствуется лишь частью доступной информации для принятия решения. Данный аспект в деятельности ЧО отражает понятие информационной *ситуации* как агрегированной информационной характеристики состояния ПО и ВС.

Ситуация — конкретный набор обстоятельств, которые влияют на функционирование системы в данное конкретное время. Введем ряд обозначений: Θ — множество заданий, которые могут быть предъявлены оператору; X и Ψ — соответственно пространства состояний ПО и ВС; S — ситуационное пространство;

Γ — множество выделенных управляемых режимов движения ПО.

Процесс восприятия ЧО различных ситуаций $s \in S$ отражает некоторая функция:

$$s = q(x, \psi),$$

где $x \in X$ и $\psi \in \Psi$ — соответственно состояния ПО и ВС.

Ситуационная модель дает формальное описание мира с помощью ситуаций, в которых предстоит действовать ЧО. Эффективным средством описания ситуаций является логика предикатов первого порядка.

Пусть $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ — алфавит возможных ситуаций. Простейшим вариантом ситуационной модели является *ситуационный граф*: его вершины представляют ситуации, а ориентированные ребра — причинно-следственные связи между ситуациями. Дальнейшее усложнение модели заключается в применении событийного механизма описания процесса смены ситуаций. Для этого в структуру модели включается множество событий Λ , причем ребра ситуационного графа означают события $\lambda \in \Lambda$, на которые должен реагировать ЧО. Такой подход соответствует асинхронному характеру действий ЧО в ЭСУ.

Функционирование ЭСУ ПО подчиняется некоторому заданию, которое определяет оперативную цель действий ЧО. При выполнении задания оператор руководствуется некоторым *оперативным планом действий*. Такой тип планирования следует относить к сценарному планированию.

Сцена определяется стереотипной ситуацией, возникшей вследствие наступления некоторого набора событий, и действиями ЧО в данной ситуации. *Сценарий* является упорядоченной последовательностью сцен, разворачивающейся в процессе функционирования системы. Отметим, что сценарные модели являются одним из способов представления знаний.

Целеполагание и многорежимность. Многорежимная структура МДО позволяет не только учитывать многообразие факторов, влияющих на движение ПО, но и рассматривать сложные стратегии движения как композицию элементарных режимов движения (стереотипизированных подпрограмм действий), которые управляются или контролируются ЧО. Режимы характеризуются кинематической структурой движения ПО, определенным набором кинематических параметров и временем выполнения.

Пусть задан алфавит таких режимов:

$$\Gamma = \{\gamma_k, k \in K\},$$

где K — множество индексов, нумерующих режимы. Целевое движение ОУ рассматривается как комбинация элементарных режимов:

$$\tilde{\Gamma} = (\tilde{\gamma}_1, \tilde{\gamma}_2, \dots, \tilde{\gamma}_F) \subset \Gamma.$$

Задача планирования действий ЧО заключается в формировании такого каскада режимов $\tilde{\Gamma}(s_0)$, порожденных начальной ситуацией $s_0 \in S$, который обеспечивает достижение текущей оперативной цели $\theta \in \Theta$.

Предлагаемые решения по построению МДО позволяют анализировать информационные и надежностные характеристики ЧО.

Временные характеристики процессов управления. В формализованном виде деятельность ЧО можно представить как динамическую структуру, осуществляющую преобразование информации в управляющие воздействия.

Простейшей динамической характеристикой одноконтурной ЭСУ ПО является *цикл регулирования* $T_{\text{ц}}$, под которым понимается период полного оборота сигнала по контуру управления, определяемый суммой задержек сигналов в машинных звеньях и временем реакции ЧО:

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4,$$

где t_1 — время прохождения сигнала через систему отображения информации; t_2 — время на восприятие, переработку информации и принятия решения ЧО; t_3 — время на выполнение управляющих действий ЧО; t_4 — инерционное время срабатывания ПО.

Ситуационное моделирование позволяет детализировать временные характеристики информационно-управляющих процессов в ЭСУ. Действительно, положим, что каждая ситуация $s \in S$ длится некоторое время $\tau(s)$. Учтем, что выполнение конкретного задания $\theta \in \Theta$ отражается определенным путем $\pi(\theta) \subset S$ в ситуационном графе. Тогда время отработки данного задания будет определяться формулой

$$T(\theta) = \sum_{s \in \pi(\theta)} \tau(s).$$

Проблема моделирования ошибок ЧО. В арсенал классических методов исследования ошибок ЧО входят:

1. Метод фреймов М. А. Котика и А. М. Емельянова — это метод построения фреймов при

реконструкции происшествия, структурный анализ которых позволяет выявлять причины сбоев в действиях ЧО.

2. Метод критических инцидентов Фланагана (J. Flanagan) — это способ анализа поведения субъекта в ситуациях, являющихся критическими в смысле достижения поставленных целей. Особо обращается внимание на то, чтобы как можно более точно и полно была описана каждая такая ситуация.

3. Логико-вероятностные методы моделирования критических ситуаций и анализа ошибок ЧО на основе аппарата деревьев событий и отказов.

4. Методы анализа надежности ЧО на основе математического аппарата марковских случайных процессов.

Реконструкция ошибок ЧО предполагает определение структуры и алгоритма его деятельности. Методологическим базисом данных процедур может служить разработанный ситуационный формализм построения МДО.

Заключение

Развиваемая авторами концепция ситуационного управления позволяет органично объединять методы логического и непрерывного динамического управления и может рассматриваться как одно из направлений развития теории логико-динамических систем.

Ситуационный подход может служить одной из фундаментальных основ пока еще не сложившейся теории управления сложными техническими объектами. Предлагаемая концепция ситуационно-целевого управления для данного класса объектов в отличие от классической двухступенчатой схемы "ситуация — действие" базируется на четырехступенчатой схеме "ситуация — цель — стратегия управления — действие", которая органично сочетается с многоцелевым принципом управления сложными системами, основанным на разбиении главной цели на промежуточные локальные цели применительно к отдельным ситуациям. В итоге процесс управления реализуется совместно тремя функциями: мониторинга ситуаций, генерации локальных целей и формирования стратегии управления, выходом которых являются соответственно диагноз текущей ситуации, новая локальная цель управления в случае изменения ситуации и стратегия управления, направленная на достижение новой цели.

Список литературы

1. **Поспелов Д. А.** Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
2. **Костенко Е. П., Михалкина Е. В.** История менеджмента: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. 606 с.
3. **Мелехин В. Б., Исмаилова Ш. Т.** Ситуационное управление техническим перевооружением производственного предприятия // Приборы + Автоматизация. 2004. № 1. С. 34–39.
4. **Секретарев Ю. А., Диденко С. А., Каравасев А. А., Мошкин Б. Н.** Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 308 с.
5. **Колесников А. А.** Ситуационное управление объективно нестационарными производственными процессами с применением динамических моделей. Уфа: Академия ВЭГУ, 2010. 132 с.
6. **Ханова А. А., Уразалиев Н. С., Усманова З. А.** Метод ситуационного управления сложными системами на основе сбалансированной системы показателей // Научный вестник НГТУ. 2015. Т. 60, № 3. С. 69–82.
7. **Розенберг И. Н.** Ситуационное управление в сфере транспорта // Образовательные ресурсы и технологии. 2015. № 2 (10). С. 42–48.
8. **Ющенко А. С., Киселев Д. В.** Ситуационный подход к организации поведения мобильного робота в условиях неопределенности // Мехатроника. 2000. № 5. С. 10–15.
9. **Арсеньев Д. Г., Шкодырев В. П.** Стратегия группового управления роботами на основе ситуационно-целевого планирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3. С. 40–43.
10. **Шалыгин А. С., Лысенко Л. Н., Толпегин О. А.** Методы ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов / Под ред. А. В. Ноздрачева и Л. Н. Лысенко. М.: Машиностроение, 2012. 584 с.
11. **Виттих В. А.** Проблемы управления и моделирования в сложных искусственных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 17–23.
12. **Mockler R. J.** Situational Theory of Management // Harvard Business Review. 1971. Vol. 49, N. 3. 146–155.
13. **Поспелов Д. А.** Принципы ситуационного управления // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1971. № 2. С. 10–12.
14. **Векленко П. В.** Ситуационный подход в познании. Омск: Амфора, 2012. 144 с.
15. **Солодухо М. Н., Румянцева М. Г.** Познавательная роль понятия "ситуация" в современной науке // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2014. № 1. С. 183–188.
16. **Симанков В. С., Шипин А. В.** Ситуационное управление сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации // Труды ФОРА. 2004. № 9. С. 116–120.
17. **Чекинов Г. П., Чекинов С. Г.** Ситуационное управление: состояние и перспективы // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2004. № 2. 32 с.
18. **Куандыков А. А.** Основы ситуационного управления сложными объектами // Вестник ВКГТУ. 2009. № 1. С. 152–158.
19. **Борисов В. В., Зернов М. М.** Реализация ситуационного подхода на основе нечеткой иерархической ситуационно-событийной сети // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 1. С. 17–30.
20. **Гюльмамедов Р. Г.** Метод построения стратегии в системах ситуационного управления // Информационно-управляющие системы. 2011. № 6. С. 36–39.
21. **Кириллов Н. П.** Концептуальная модель объекта ситуационного управления функциональными состояниями технических систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 61–75.
22. **McCarthy J.** Situations, Actions and Causal Laws. Memo 2. Stanford University Artificial Intelligence Project, 1963 (Reprinted in: M. Minsky ed. Semantic Information Processing. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1968. P. 410–418).
23. **McCarthy J., Hayes P. J.** Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence / Machine Intelligence 4. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1969. P. 463–502.
24. **Поспелов Д. А., Пушкин В. Н.** Мышление и автоматизация. М.: Советское радио, 1972. 224 с.
25. **Клыков Ю. И.** Семиотические основы ситуационного управления. М.: МИФИ, 1974. 220 с.
26. **Клыков Ю. И.** Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974. 213 с.
27. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Современные проблемы автоматизации и интеллектуализации эргатических систем управления подвижными объектами / Интеллектуальные системы управления: Коллективная монография. Под ред. С. Н. Васильева М.: Машиностроение, 2010. С. 84–95.
28. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Мультиагентные технологии в эргатических системах управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 7–13.
29. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Проблема интеллектуальной поддержки оператора в эргатических системах управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XII Междунар. конф. Самара: Самарский НЦ РАН, 2010. С. 18–27.
30. **Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Проблемы и перспективы автоматизации эргатических систем управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление: Матер. 7-й науч.-техн. конф. СПб.: ОАО Концерн ЦНИИ "Электроприбор", 2010. С. 27–33.
31. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** О ситуационной методологии синтеза автоматических систем // 6-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: Матер. 6-й Всеросс. мультиконф. Т. 2. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. С. 60–64.
32. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Ситуационно-целевой подход в задачах автоматизации эргатических систем управления подвижными объектами // Современные проблемы прикладной математики, информатики, автоматизации и управления: Матер. 3-го междунар. семинара. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. С. 77–83.
33. **Филимонов Н. Б.** Системы многоорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Изв. вузов. Приборостроение. 1988. № 2. С. 18–33.
34. **Шеридан Т. Б., Феррел У. Р.** Системы человек—машина. Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором. М.: Машиностроение, 1980. 400 с.
35. **Павлов В. В.** Синтез стратегий в человеко-машинных системах. К.: Віща школа, 1989. 162 с.
36. **Адаменко А. Н., Ашерев А. Т., Бердников И. Л. и др.** Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: Справочник / Под общ. ред. А. И. Губинского и В. Г. Евграфова. М.: Машиностроение, 1993. 528 с.
37. **Человеко-машинные системы управления / Машиностроение. Энциклопедия. Т. 1-4. Автоматическое управление. Теория. Раздел 8 / Под общ. ред. Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000. С. 604–641.**
38. **Царегородцев А. В.** Современные технологии управления в человеко-машинных системах. М.: Радио и связь, 2002. 84 с.
39. **Смолян Г. Л., Тоболев К. В.** Человеческий фактор в системах управления / Новое в жизни, науке и технике. Вып. 9. М.: Знание, 1974. 64 с.
40. **Вопросы кибернетики. Эффективность деятельности оператора / Под ред. Ю. М. Забродина, А. П. Чернышева. М.: ВИНТИ, 1982. 182 с.**
41. **Сильвестров М. М., Козиоров Л. М., Пономаренко В. А.** Автоматизация управления летательными аппаратами с учетом человеческого фактора. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
42. **Ефремов А. В., Оглобин А. В., Предтеченский А. Н., Родченко В. В.** Летчик как динамическая система. М.: Машиностроение, 1992. 336 с.
43. **Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б.** Ситуационная методология анализа и моделирования эргатических систем управления // Восьмая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: Матер. 8-й Всеросс. мультиконф. МКПУ-2015 в 3-х т. Т. 1. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 155–159.
44. **Красовский А. А.** Основы теории авиационных тренажеров. М.: Машиностроение, 1995. 304 с.

Situational Approach in the Problems of Automation Control by Technical Objects

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

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

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

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

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

Accepted on May 20, 2018

The situational approach originated initially at the management in 1960's of the XX th century at present has not the proper development and extension in control problems by technical objects. The true possibilities of the situational approach for the theoretical automation are uncovered themselves in rethinking of the key notions like "situation", "situational model" and "situational control" for class of complex technical systems. The retrospective of the formation of the situational approach is discussed in the article, and also the questions of the application of the situational methodology in the problems of the automatic control and the automation of the ergatic control systems are considered. The conception of the situational control developed by the authors permits to join naturally the methods of the logical and continuous dynamical control and allows to consider as one from the directions of the development of the theory of the logic-dynamical systems. This fact is conclusively illustrated with use of the situational methodology in the systems of multiregime regulation. The aim of the regulation is decomposed into local aims. The definite situations and the regimes of regulation conform to these aims. And the processes of the regulation themselves are realized by means of two-level hierarchical design of the system: the lower level puts together the bank of subcontrollers working off the local aims, and at the top of the level the control of the flowing situations is realized and the logic process of the switching of the regimes is represented. The situational approach used for one from the fundamental bases for the present control theory by complex technical objects. The suggested conception of the situational-goal control for the given class of the objects in contrast to the classical two-step scheme "situation-action" is based on four-step scheme "situation-aim-control strategy-action", which meshes perfectly with multiple goal control principle by complex systems based on the decomposition of the main aim into intermediate local aims in connection with the separate situations. As a final result, the control process is realized by three functions simultaneously: monitoring of the situations, the generation of local aims and formation of the control strategy. Their outputs are diagnose of the flowing situation, the new local aim of control in case of the situation's change and the control strategy respectively.

Keywords: control by the technical objects, the situational approach, situational-goal control, situational models, multiregime regulation

Acknowledgements: This article was supported by grant of the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 16-08-00313-a).

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Situational Approach in the Problems of Automation Control by Technical Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 563–578.

DOI: 10.17587/mau.19.563-578

References

1. Pospelov D. A. *Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika* (Situation control: theory and practice), Moscow, Nauka, 1986 (in Russian).
2. Kostenko E. P., Mihalkina E. V. *Istoriya menedzhmenta: uchebnoe posobie* (History of management: textbook), Rostov-na-Donu, Publishing house of YUFU, 2014 (in Russian).
3. Melekhin V. B., Ismailova Sh. T. *Situacionnoe upravlenie tekhnicheskimi perevozuruzheniem proizvodstvennogo predpriyatiya* (Situational management of technical re-equipment of the production enterprise), *Pribory + Avtomatizatsiya*, 2004, no 1, pp. 34–39 (in Russian).
4. Sekretarev Yu. A., Didenko S. A., Karavaev A. A., Moshkin B. N. *Situacionnoe upravlenie ehnergeticheskimi ob"ektami i processami ehlektroehnergeticheskoy sistemy* (Situational management of energy facilities and processes of the electric power system), Novosibirsk, Publishing house of NGTU, 2007 (in Russian).
5. Kolesnikov A. A. *Situacionnoe upravlenie ob"ektivno nestacionarnymi proizvodstvennymi processami s primeneniem dinamicheskikh modelej* (Situational control objectively non-stationary manufacturing processes with the use of dynamic models), Ufa, Akademiya VEFGU, 2010 (in Russian).
6. Hanova A. A., Urazaliev N. S., Usmanova Z. A. *Metod situacionnogo upravleniya slozhnymi sistemami na osnove sbalansirovannoy sistemy pokazatelej* (Method of situational control of complex systems based on the balanced scorecard), *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2015, vol. 60, no 3, pp. 69–82 (in Russian).
7. Rozenberg I. N. *Situacionnoe upravlenie v sfere transporta* (Situation control in the field of transport), *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii*, 2015, no. 2 (10), pp. 42–48 (in Russian).
8. Yushchenko A. C., Kiselev D. V. *Situacionnyy podhod k organizatsii povedeniya mobil'nogo robota v usloviyakh neopredelennosti* (Situational approach to the organization of mobile robot behavior under uncertainty), *Mekhatronika*, 2000, no. 5, pp. 10–15 (in Russian).
9. Arsen'ev D. G., Shkodyrev V. P. *Strategiya gruppovogo upravleniya robotami na osnove situacionno-celevogo planirovaniya* (Strategy of group control of robots on the basis of situational and target planning), *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 3, pp. 40–43 (in Russian).
10. Shalygin A. S., Lysenko L. N., Tolpegin O. A. *Metody situacionnogo upravleniya dvizheniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov* (Methods of situational control-movement of unmanned aerial vehicles), pod. red. A. V. Nozdracheva i L. N. Lysenko, Moscow, Mashinostroenie, 2012 (in Russian).
11. Vittih V. A. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh iskusstvennykh sistemakh* (Problems of control and modeling in complex artificial systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 17–23 (in Russian).

12. **Mockler R. J.** Situational Theory of Management, Harvard Business Review, 1971, vol. 49, no. 3, pp. 146–155.
13. **Pospelov D. A.** Principy situacionnogo upravleniya (Principles of situational control), *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1971, no. 2, pp. 10–12 (in Russian).
14. **Veklenko P. V.** *Situatsionnyj podhod v poznanii* (Situational approach to knowledge), Monografiya, Omsk, Amfora, 2012 (in Russian).
15. **Soloduh M. N., Rumyantseva M. G.** *Poznavatel'naya rol' ponyatiya "situatsiya" v sovremennoj nauke* (The cognitive role of the concept "situation" in modern science), *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva*, 2014, no. 1, pp. 183–188 (in Russian).
16. **Simankov V. S., Shipin A. V.** *Situatsionnoe upravlenie slozhnym ob'ektom v usloviyah nechetkoj iskhodnoj informacii* (Situational control of a complex object in terms of fuzzy outcome information), *Trudy FOR A*, 2004, no. 9, pp. 116–120 (in Russian).
17. **Chekinov G. P., Chekinov S. G.** *Situatsionnoe upravlenie: sostoyaniye i perspektivy* (Situation control: status and prospects), *Prilozhenie k zhurnalu "Informatsionnye tekhnologii"*, 2004, no. 2, 32 p. (in Russian).
18. **Kuandykov A. A.** *Osnovy situatsionnogo upravleniya slozhnymi ob'ektami* (Fundamentals of situational control of complex objects), *Vestnik VKGTU*, 2009, no. 1, pp. 152–158 (in Russian).
19. **Borisov V. V., Zernov M. M.** *Realizatsiya situatsionnogo podhoda na osnove nechetkoj ierarhicheskoy situatsionno-sobytiynoy seti* (Implementation of situational approach based on fuzzy hierarchical situational-event network), *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2009, no. 1, pp. 17–30 (in Russian).
20. **Gyul'mamedov R. G.** *Metod postroeniya strategii v sistemah situatsionnogo upravleniya* (A method of formation strategies in systems of situational control), *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2011, no. 6, pp. 36–39 (in Russian).
21. **Kirillov N. P.** *Konceptual'naya model' ob'ekta situatsionnogo upravleniya funktsional'nymi sostoyaniyami tekhnicheskikh sistem* (Conceptual model of the object of situational control of functional states of technical systems), *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2012, no. 4, pp. 61–75 (in Russian).
22. **McCarthy J.** Situations, Actions and Causal Laws. *Memo 2. Stanford University Artificial Intelligence Project*, 1963 (Reprinted in M. Minsky ed. *Semantic Information Processing*. Cambridge, Mass., MIT Press, 1968, pp. 410–418).
23. **McCarthy J., Hayes P. J.** Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence, *Machine Intelligence 4*, Edinburgh, Edinburgh University Press, 1969, pp. 463–502.
24. **Pospelov D. A., Pushkin V. N.** *Myshlenie i avtomaty* (Thinking and machines), Moscow, Sovetskoe radio, 1972 (in Russian).
25. **Klykov Yu. I.** *Semioticheskie osnovy situatsionnogo upravleniya* (Semiotics the basics of situational control), Moscow, MIFI, 1974 (in Russian).
26. **Klykov Yu. I.** *Situatsionnoe upravlenie bol'shimi sistemami* (Situational control of large systems), Moscow, Ehnergiya, 1974 (in Russian).
27. **Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Sovremennyye problemy avtomatizatsii i intellektualizatsii ehrgaticheskikh sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami* (Modern problems of automation and intellectualization of ergatic control systems of mobile objects), *Intellektual'nye sistemy upravleniya: Kollektivnaya monografiya*, Moscow, Mashinostroenie, 2010, pp. 84–95 (in Russian).
28. **Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Mul'tiagentnye tekhnologii v ehrgaticheskikh sistemah upravleniya* (Multi-agent technologies in ergatic control systems), *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskije Nauki*, 2010, no. 3 (104), pp. 7–13 (in Russian).
29. **Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Problema intellektual'noj podderzhki operatora v ehrgaticheskikh sistemah upravleniya* (The problem of intelligent operator support in ergatic control systems), *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah*, Trudy HII Mezhdunar. konf., Samara, Samarskij NC RAN, 2010, pp. 18–27 (in Russian).
30. **Teryaev E. D., Petrin K. V., Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Problemy i perspektivy avtomatizatsii ehrgaticheskikh sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami* (Problems and prospects of automation of ergatic control systems of mobile objects), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie: Materialy 7-j nauch.-tekhn. konf.*, SPb., OAO Koncern CNII "Ehlektrapribor", 2010, pp. 27–33 (in Russian).
31. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *O situatsionnoj metodologii sinteza avtomaticheskikh sistem* (About situational methodology of synthesis of automatic systems), *6-ya Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: Materialy 6-j Vseross. mul'tikonf.*, vol. 2, Rostov-na-Donu, Publishing house of YUFU, 2013, pp. 60–64 (in Russian).
32. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Situatsionno-celevoy podhod v zadachah avtomatizatsii ehrgaticheskikh sistem upravleniya podvizhnymi ob'ektami* (Situational-target approach in automation problems of ergatic control systems of mobile objects), *Sovremennyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki, avtomatizatsii i upravleniya: Materialy 3-go mezhdunar. Seminara, Sevastopol'*, Publishing house of SevNTU, 2013, pp. 77–83 (in Russian).
33. **Filimonov N. B.** *Sistemy mnogorezhimnogo regulirovaniya: koncepciya, principy postroeniya, problemy sinteza* (Multi-mode control systems: concept, design principles, synthesis problems), *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 1988, no. 2, pp. 18–33 (in Russian).
34. **Sheridan T. B., Ferrel U. R.** *Sistemy chelovek–mashina. Modeli obrabotki informacii, upravleniya i prinyatiya reshenij chelovekom-operatorom* (Man–machine systems. Models of information processing, management and decision-making by human operator), Moscow, Mashinostroenie, 1980 (in Russian).
35. **Pavlov V. V.** *Sintez strategij v cheloveko-mashinnykh sistemah* (Synthesis of strategies in human-machine systems), Kiev, Vishcha shkola, 1989 (in Russian).
36. **Adamenko A. N., Asherov A. T., Berdnikov I. L. i dr.** *Informatsionno-upravlyayushchie cheloveko-mashinnye sistemy: Issledovanie, proektirovanie, ispytaniya: Spravochnik* (Information and control man-machine systems: Research, design, testing: Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1993 (in Russian).
37. **Cheloveko-mashinnye sistemy upravleniya (Human-machine control systems), *Mashinostroenie. EHnciklopediya. T. 1-4. Avtomaticheskoe upravlenie. Teoriya. Razdel 8*, Moscow, Mashinostroenie, 2000, pp. 604–641 (in Russian).**
38. **Caregorodcev A. V.** *Sovremennyye tekhnologii upravleniya v cheloveko-mashinnykh sistemah* (Modern control technologies in human-machine systems), Moscow, Radio i svyaz', 2002 (in Russian).
39. **Smolyan G. L., Tobolev K. V.** *Chelovecheskij faktor v sistemah upravleniya* (Human factor in control systems), *Novoe v zhizni, nauke i tekhnike*, iss. 9, Moscow, Znanie, 1974 (in Russian).
40. **Voprosy kibernetiki. Ehffektivnost' deyatelnosti operatora** (Questions of Cybernetics. The working efficiency of the operator), pod red. Yu. M. Zbrodina, A. P. Chernysheva, Moscow, VINITI, 1982, 182 p. (in Russian).
41. **Sil'vestrov M. M., Koziorov L. M., Ponomarenko V. A.** *Avtomatizatsiya upravleniya letatel'nymi apparatami s uchetoм chelovecheskogo faktora* (Automation of aircraft control taking into account the human factor), Moscow, Mashinostroenie, 1986 (in Russian).
42. **Efremov A. V., Oglobin A. V., Predtechenskiy A. N., Rodchenko V. V.** *Letchik kak dinamicheskaya sistema* (Pilot as a dynamic system), Moscow, Mashinostroenie, 1992 (in Russian).
43. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Situatsionnaya metodologiya analiza i modelirovaniya ehrgaticheskikh sistem upravleniya* (Situational methodology of analysis and modeling of ergatic control systems), *Vos'maya Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: Materialy 8-j Vseross. mul'tikonf.*, MKPU—2015, vol. 1. Rostov-na-Donu, Publishing house of YUFU, 2015, pp. 155–159 (in Russian).
44. **Krasovskiy A. A.** *Osnovy teorii aviatsionnykh trenazherov* (Fundamentals of the theory of flight simulators), Moscow, Mashinostroenie, 1995 (in Russian).

Б. В. Сухинин, д-р техн. наук, проф., eeo@uic.tula.ru, В. В. Сурков, д-р техн. наук, доц., vvs150747@mail.ru,
Тулский государственный университет

К вопросу о методах АКОР и АКАР в задачах синтеза нелинейных систем управления

Предлагается продолжить сравнение известных методов аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) и аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), обсуждаемых в статье [1]. Приводится их сравнение с методом АКОР по критерию точности регулирования (АКОРТ). Метод АКОРТ идейно близок к методу АКАР, поскольку основан на том же физическом принципе сжатия фазового пространства по мере приближения изображающей точки к началу координат и также использует притягивающие многообразия (функции переключения). Показано, что метод АКОРТ обладает значительными достоинствами, связанными с простой процедурой аналитического конструирования нелинейных законов оптимального управления: АКОРТ осуществляется строго математически непосредственно по уравнениям объекта, причем не требуется решения каких-либо дифференциальных уравнений или искусственного введения в рассмотрение каких-либо функций преобразования в виде агрегированных макропеременных. Наиболее сложной математической процедурой является дифференцирование переменных и подстановка уравнений объекта управления. Главное отличие метода АКОРТ в теоретическом плане от всех известных методов состоит в том, что этот метод дает абсолютно точное решение и гарантирует нулевую ошибку регулирования при двукратной инвариантности как к не измеряемым случайным воздействиям (помехам), в том числе и к полезной помехе (момент нагрузки), так и к отклонениям параметров объекта управления от номинальных значений (нестабильность параметров), при этом все коэффициенты ошибок (по положению, скорости, ускорению, рывку и т. д.) также равны нулю.

Ключевые слова: нелинейные системы, теория оптимального по точности управления, метод АКОР, синтез управления, точность

Точность — вежливость королей и долг всех добрых людей.

Король Людовик XIV

Введение

Проблема аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), начиная с работ А. М. Летова и А. А. Красовского (именно он ввел термин "аналитическое конструирование регуляторов (АКР)", является основополагающей, но вместе с тем и наиболее трудноразрешимой [1] до сих пор, несмотря на то что всевозможные методы АКОР (АКР), наряду с методом Р. Беллмана или принципом максимума Понтрягина, и в настоящее время составляют наиболее важный раздел теории и практики синтеза нелинейных систем оптимального управления.

Подробно рассмотрев проблемы различных модных направлений теории оптимального управления, в том числе на основе прогнозирующих моделей или на основе полиэдральной методологии, а также методов АКОР по разнообразным критериям, авторы статьи [1] показали, что "интерес к практическому применению методов АКОР по-прежнему высок: так, поисковый запрос "LQR or LQG" в реферативной системе Scopus только за период 2000—2016 гг. выдает более 5000 уникальных ссылок на научные работы".

Обозначенные в статье [1] проблемы, которые так и не решены непосредственно методами Понтрягина или Беллмана, явились причиной появления метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) А. А. Колесникова, "который позволяет весьма эффективно решать" обходным путем (так же, как и метод А. А. Красовского по критерию обобщенной работы) частную "проблему формирования структуры и выбора весовых коэффициентов оптимизирующих функционалов, имеющих, как правило, сопровождающий характер" и соответствующих заданной совокупности инвариантных (интегральных, притягивающих) многообразий или, другими словами, агрегированных макропеременных относительно координат состояния объекта или, одним словом, аттракторов, гарантирующих асимптотическую устойчивость движения и обеспечивающих требуемые показатели качества замкнутых систем.

Метод АКАР имеет ряд достоинств и "значительную эвристическую силу", но одновременно таит в себе и определенные трудности эвристического выбора аттрактора и оптимизирующего функционала, зависящего от интуиции и

опыта проектировщика. Следует подчеркнуть, что здесь использовано понятие "эвристика" из Википедии: "Эвристический алгоритм (эвристика) — алгоритм решения задачи, включающий практический метод, не являющийся гарантированно точным или оптимальным, но достаточный для решения поставленной задачи. Позволяет ускорить решение задачи в тех случаях, когда точное решение не может быть найдено".

Главный и общий недостаток всех без исключения рассматриваемых в работе [1] методов — это неопределенность критериев оценки качества управления, которые либо имеют сопровождающий характер (метод АКАР), либо имеют проблему выбора весовых коэффициентов (методы АКОР), либо имеют различные комбайны из конкретных критериев с весовыми коэффициентами: быстродействия, расхода энергии, вещества и т. д. (многокритериальная оптимизация), в том числе и квадратичные (по существу, это тот же комбайн). Это все равно, что гнаться за двумя зайцами...

Подробно рассмотрев причины сложившегося кризиса в теории управления (ТУ), Н. Б. Филимонов показал, что "ключом к его преодолению является достижение в задачах управления органического единства математической строгости и физического смысла [2]. Автор отмечает, что "несмотря на актуальность проблемы разработки физической ТУ, она, фактически, так и осталась без внимания и не вызвала никакой реакции со стороны ни отечественных, ни зарубежных специалистов. За прошедшие четверть века не опубликована ни одна работа, посвященная данной проблеме".

Один из возможных подходов к разработке математически строгой физической теории управления рассмотрен в работе [3]. Разработка физической ТУ очевидно должна начинаться с выбора конкретного физического критерия [3] не "комбайнового" типа. Наибольшее значение из всех известных таких критериев имеет критерий максимальной точности воспроизведения (что толку от того, что деталь изготовлена быстро, с минимумом ресурсов, но не точно). Общим признаком интегральных критериев точности регулирования является их независимость в явной форме от управления:

$$J = \int_0^T F_0(\mathbf{X}) dt, \\ F_0(\mathbf{X}) > 0, \text{ время } T \text{ не определено,} \quad (1)$$

причем критерий быстродействия является частным случаем критерия точности при $F_0(\mathbf{X}) = 1$ или критерий быстродействия является одновременно и критерием точности регулирования [4]. Можно показать [5], что в рамках достаточно общего критерия точности (1) находится также и энергосберегающий критерий расхода "сигнала управления", присутствующий в "комбайновом" и полуопределенном критерии обобщенной работы А. А. Красовского.

Известно, что минимизация критерия точности регулирования обеспечивается идеальными релейными управлениями:

$$u_{ij}(t) = -\text{sign}(\psi_{ij}(\mathbf{X})), \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где $|u_{ij}(t)| \leq 1$; $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ — вектор фазовых координат; m — число управляющих воздействий; n — порядок объекта управления (число интервалов управления); $\psi_{ij}(\mathbf{X})$ — искомые функции переключения, причем $\psi_{ij}(\mathbf{X}) = 0$ — поверхности переключения, проходящие через начало координат $\psi_{ij}(0) = 0$.

В данной работе предлагается обсудить математически точное аналитическое решение задачи оптимальной точности регулирования на основе использования метода Беллмана [5], не зависящее от интуиции и опыта проектировщика: в соответствии с синергетической теорией — теорией не силового управления, не противоречащего естественному движению объекта, — не задаваться эвристически заранее желаемым для объекта притягивающим многообразием в пространстве состояний (метод АКАР) и не вводить заранее полуопределенный критерий обобщенной работы для того, чтобы хоть как-то получить решение задачи (метод АКР). Ставится задача: сконструировать закон управления строго аналитически по уравнениям объекта, непосредственно связывая математически определяемые по критерию точности регулирования многообразия (поверхности переключения) с внутренними свойствами объекта, что согласуется с известным в механике принципом наименьшего принуждения Гаусса.

Постановка задачи управления в методе АКОР по критерию точности

Пусть объект управления описывается векторно-матричным нелинейным дифференци-

альным уравнением возмущенного движения в соответствии с теорией возмущенно-невозмущенного движения А. М. Ляпунова:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{X}) + \mathbf{B}(\mathbf{X})\mathbf{U}, \quad (3)$$

где $\mathbf{U} = (u_1, \dots, u_m)^T$ — вектор управления; $\mathbf{A}(\mathbf{X}) = (a_1(\mathbf{X}), \dots, a_n(\mathbf{X}))^T$ — вектор-функция; $\mathbf{B}(\mathbf{X}) = (b_{ij}(\mathbf{X}))_{n \times m}$ — функциональная матрица.

Задача АКОР по критерию точности регулирования (АКОРТ) формулируется следующим образом [5]:

найти функции переключения закона управления $\mathbf{U} = \mathbf{U}(\mathbf{X})$ (2), который переводит объект (3) из любого начального состояния $\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0$ в начало координат фазового пространства $\mathbf{X} = 0$, доставляя минимум функционалу (1).

Процедура решения задачи АКОРТ базируется на методе динамического программирования Р. Беллмана. Ключевыми моментами этой процедуры является математически точное аналитическое определение функций переключения (по А. А. Колесникову, притягивающих многообразий, обеспечивающих сжатие фазового пространства по мере приближения объекта к началу координат) на каждом интервале управления строго по уравнениям объекта с привлечением (в случае необходимости) математической операции дифференцирования фазовых координат. Отличительной особенностью предлагаемого метода является непрерывность функции Беллмана и ее частных производных на каждом интервале управления благодаря декомпозиции управления u_i на n интервалов, для которых определяются функции переключения из однотипных функциональных уравнений вида [3, 5], эквивалентных исходным уравнениям объекта (3) на каждом интервале управления:

$$\dot{\psi}_j = f(\mathbf{X}) + \varphi(\mathbf{X})u, \quad \psi_n = x_n. \quad (4)$$

При этом необходимо выполнить единственное достаточное условие управляемости (реализуемости) релейной системы на каждом интервале в виде нестрогого равенства (для АКОРТ):

$$|f(\mathbf{X})| \leq \varphi(\mathbf{X}), \quad \varphi(\mathbf{X}) > 0, \quad (5)$$

которое легко осуществить в виде подчиненного управления аналогично случаю ограничения координат. Условие (5) является одновременно

и условием устойчивости движения системы на интервалах, и условием возникновения скользящего режима [5]. Чем ближе условие (5) к строгому равенству на каждом интервале, тем более быстрым будет процесс управления, а при равенстве получим условие оптимального быстрого действия для не осциллирующих объектов.

Достоинство метода заключается также и в том, что поскольку он гарантирует оптимальную точность регулирования в результате применения метода Р. Беллмана, в процедуре аналитического синтеза вектора управления функционал (1) и уравнение Беллмана непосредственно не участвуют.

Таким образом, данный точный метод решения задач АКОР обеспечивает теоретически строго нулевую ошибку регулирования, причем все коэффициенты ошибок (по положению, скорости, ускорению, рывку и т. д.) также равны нулю.

Сравнительные примеры синтеза законов управления методом АКОР по критерию точности

Все примеры и их нумерация взяты из работы [1], где выявлены достоинства и недостатки различных методов АКОР и АКАР.

Пример 1. Задача управления короткопериодическим движением самолета, уравнения которого имеют вид

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \quad \dot{x}_2(t) = -a_1x_1 - a_2x_2 + a_3u, \quad (6)$$

где x_1, x_2 — угол атаки и скорость его изменения; u — отклонение руля высоты; параметры равны: $a_1 = 4,71 \text{ с}^{-2}$; $a_2 = 1,76 \text{ с}^{-1}$; $a_3 = 7,50 \text{ с}^{-2}$.

Будем предполагать, что уравнения (6) записаны в отклонениях.

Ставится задача синтеза в аналитическом виде закона оптимального управления рулем высоты $u_{\text{оп}}(x_1, x_2)$, стабилизирующего движение самолета по углу атаки ($x_1 = x_2 = 0$) с нулевой ошибкой регулирования.

Рассмотрим решение задачи синтеза закона оптимального управления объектом (6) с использованием идеологии метода АКОРТ [5, 6]. Согласно этому методу здесь имеется объект второго порядка, следовательно, два интервала управления, и необходимо принудительно выполнить одно ограничение (5) или доказать, что оно автоматически выполняется.

Решение. Составим функциональное уравнение (4) для объекта (6), предполагая $g_i = \text{const} \neq 0$, $g_1 = 1$, аналогично [3]:

$$\dot{\psi}(\mathbf{X}) = \dot{x}_1 + g_2 \dot{x}_2. \quad (7)$$

При этом функция переключения ψ определяется простым интегрированием уравнения (7):

$$\psi = x_1 + g_2 x_2 + C, \quad (8)$$

причем константа интегрирования $C = 0$ определяется из условия прохождения поверхности переключения через начало координат: $\psi(0) = 0$.

Подставим в выражение (7) уравнения объекта:

$$\dot{\psi}(\mathbf{X}) = x_2 - g_2(a_1 x_1 + a_2 x_2) + g_2 a_3 u$$

и запишем условие (5):

$$|x_2 - g_2(a_1 x_1 + a_2 x_2)| \leq g_2 a_3$$

или

$$|\psi_2| \leq 1, \quad \psi_2 = \frac{x_2 - g_2(a_1 x_1 + a_2 x_2)}{g_2 a_3}. \quad (9)$$

Используя принцип подчиненного управления для учета ограничения (9), запишем оптимальное по точности управление для реальных координат:

$$u = \text{sign}(\text{sign}(x_{1\text{зад}} - \psi) - \psi_2)$$

или

$$u = \text{sign} \left[\text{sign}(x_{1\text{зад}} - x_1 - g_2 x_2) - \frac{x_2 - g_2(a_1 x_1 + a_2 x_2)}{g_2 a_3} \right], \quad (10)$$

где $x_{1\text{зад}}$ — задание угла атаки.

Отметим, что управление (10) оптимально по точности при любом $g_2 \neq 0$, который влияет на степень быстродействия согласно условию (5).

Предположим теперь, что на координату x_2 наложено следующее ограничение: $|x_2| \leq B$. Запишем его в виде

$$|\psi_3| \leq 1; \quad \psi_3 = \frac{x_2}{B}. \quad (11)$$

Тогда оптимальное управление будет иметь вид

$$u = \text{sign}(\text{sign}(\text{sign}(x_{1\text{зад}} - \psi) - \psi_2) - \psi_3). \quad (12)$$

На рис. 1 представлены графики изменения координат объекта (6) с управлением (12). В отличие от аналогичных графиков в работе [1] здесь переходные процессы апериодические, без перерегулирования, время регулирования несколько меньше. В законе (12) не требуется выдумывать и учитывать дополнительные параметры (β_1, β_2, T_2). Из рис. 1 следует, что в ограничении (11) для x_2 неудачно выбрано числовое значение $B = 5$.

Следует отметить, что решение рассмотренной выше задачи оптимального управления объектом (6) с помощью метода АКОР по критерию точности сводится к элементарным алгебраическим процедурам. Аналитическая мощь, минимальный объем выкладок при определении оптимального закона управления и эффективность математически точного метода АКОРТ с нулевой ошибкой регулирования будут показаны в последующих примерах.

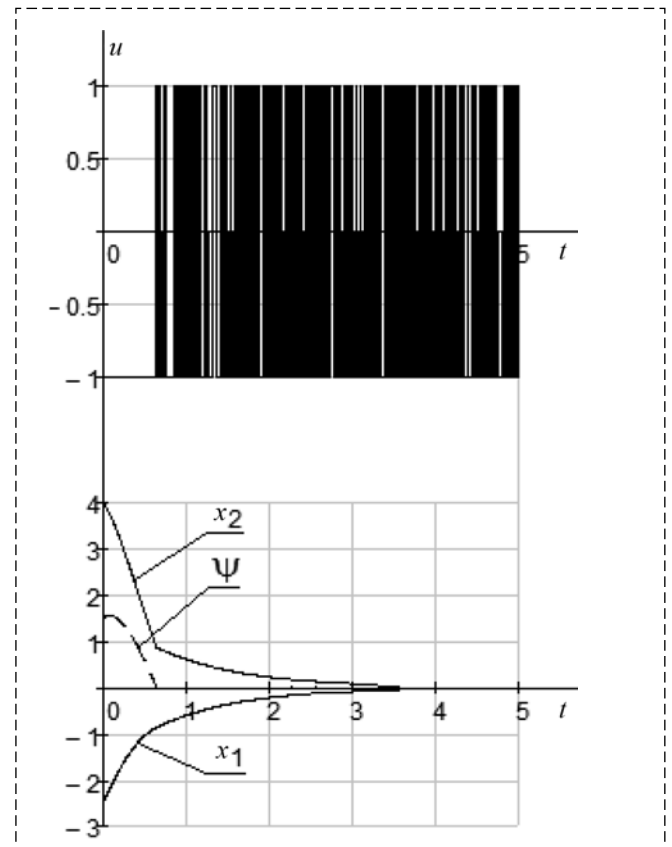


Рис. 1. Графики изменения координат объекта (6) и управления (12) при $x_1(0) = -2,5$, $x_2(0) = 4$, $B = 5$, $x_{1\text{зад}} = 0$

Пример 2. Задача синтеза оптимального по точности закона регулирования объектом третьего порядка:

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \dot{x}_2(t) = bf(x_1) + x_3; \dot{x}_3(t) = u, \quad (13)$$

где $f(x_1) = \sin x_1$.

Будем и здесь предполагать, что уравнения (13) записаны в отклонениях.

Вначале, как и в работе [1], рассмотрим задачу оптимизации системы управления с объектом (13) при $b = 0$, т. е.

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \dot{x}_2(t) = x_3; \dot{x}_3(t) = u. \quad (14)$$

Синтезируем закон управления объектом (14) на основе идеологии метода АКОРТ. Здесь имеется объект третьего порядка, следовательно, три интервала управления, и необходимо принудительно выполнить два ограничения (5).

Решение. Аналогично предыдущему примеру составим функциональное уравнение при $g_i = \text{const} \neq 0$

$$\dot{\psi} = \dot{x}_1 + g_2\dot{x}_2 + g_3\dot{x}_3 = x_2 + g_2x_3 + g_3u, \quad (15)$$

причем $\psi = x_1 + g_2x_2 + g_3x_3$. Запишем условие (5) для первого интервала: $|x_2 + g_2x_3| \leq g_3$ или

$$|\psi_2| \leq 1; \psi_2 = \frac{x_2 + g_2x_3}{g_3}, \quad (16)$$

где ψ_2 — функция переключения второго интервала.

Определим $\dot{\psi}_2 = \frac{\dot{x}_2 + g_2\dot{x}_3}{g_3} = \frac{x_3 + g_2u}{g_3}$. Запишем условие (5) для второго интервала: $|x_3| \leq g_2$ или

$$|\psi_3| \leq 1; \psi_3 = \frac{x_3}{g_2}. \quad (17)$$

Итак, закон оптимального по точности управления с принудительным выполнением условий (16), (17) имеет вид

$$u = \text{sign}(\text{sign}(\text{sign}(x_{1\text{зад}} - \psi) - \psi_2) - \psi_3). \quad (18)$$

Здесь коэффициенты $g_i = \text{const} \neq 0$ могут быть какие угодно. Выбором значений коэффициентов g_2, g_3 в замкнутой системе с линейными обратными связями можно дополнительно обеспечить наименьшее время переход-

ных процессов. Если необходимо, то можно, не вводя никакие макропеременные, учесть и ограничение, наложенное на координату x_3 : $|x_3| \leq B$ аналогично предыдущей задаче:

$$u = \text{sign}(\text{sign}(\text{sign}(\text{sign}(x_{1\text{зад}} - \psi) - \psi_2) - \psi_3) - \psi_4),$$

$$\psi_4 = \frac{x_3}{B}. \quad (19)$$

Синтезируем далее закон управления объектом (13).

Решение. Составим функциональное уравнение (4) на первом интервале для объекта (13), предполагая $g_i = \text{const} \neq 0, g_1 = 1$:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(\mathbf{X}) &= \dot{x}_1 + g_2\dot{x}_2 + g_3\dot{x}_3 = \\ &= x_2 + g_2bf(x_1) + g_2x_3 + g_3u. \end{aligned} \quad (20)$$

Интегрируя (20), имеем

$$\psi = x_1 + g_2x_2 + g_3x_3. \quad (21)$$

Запишем условие (5) для первого интервала: $|x_2 + g_2bf(x_1) + g_2x_3| \leq g_3, g_3 > 0$ или

$$|\psi_2| \leq 1; \psi_2 = \frac{x_2 + g_2bf(x_1) + g_2x_3}{g_3}, \quad (22)$$

где ψ_2 — функция переключения второго интервала.

Функциональное уравнение второго интервала:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_2 &= \frac{\dot{x}_2 + g_2bf'(x_1) + g_2\dot{x}_3}{g_3} = \\ &= \frac{bf(x_1) + x_3 + g_2bf'(x_1) + g_2u}{g_3}. \end{aligned}$$

Условие (5) для второго интервала: $|bf(x_1) + x_3 + g_2bf'(x_1)| \leq g_2, g_2 > 0$ или

$$\begin{aligned} |\psi_3| &\leq 1; \psi_3 = \frac{bf(x_1) + x_3 + g_2bf'(x_1)}{g_2} = \\ &= \frac{b \sin x_1 + x_3 + g_2bx_2 \cos x_1}{g_2}, \end{aligned} \quad (23)$$

где ψ_3 — функция переключения третьего интервала.

Используя принцип подчиненного управления для учета ограничений (22) и (23), запишем оптимальное по точности управление для реальных координат:

$$u = \text{sign}(\text{sign}(\text{sign}(x_{1\text{зад}} - \psi) - \psi_2) - \psi_3). \quad (24)$$

Если на координату x_3 наложено ограничение $|x_3| \leq B$, то его можно также легко реализовать аналогично предыдущему примеру.

Пример 3. Синтез системы управления объектом, состоящим из $(n - 1)$ инерционных и одного интегрирующего звена:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{x}_1 &= k_1 x_2; & T_i \dot{x}_i + x_i &= k_i x_{i+1}, \\ i &= 2, \dots, n-1; & T_n \dot{x}_n + x_n &= k_n u. \end{aligned} \quad (25)$$

Решение. Запишем функциональное уравнение (4) для объекта (25):

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(\mathbf{X}) &= T_1 \dot{x}_1 + \sum_{i=2}^{n-1} g_i T_i \dot{x}_i + g_n T_n \dot{x}_n = \\ &= k_1 x_2 + \sum_{i=2}^{n-1} g_i (k_i x_{i+1} - x_i) + g_n (k_n u - x_n). \end{aligned} \quad (26)$$

Сгруппируем слагаемые с одинаковыми фазовыми координатами в правой части уравнения (26):

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(\mathbf{X}) &= (k_1 - g_2) x_2 + \\ &+ \sum_{i=2}^{n-1} (g_i k_i - g_{i+1}) x_{i+1} + g_n k_n u. \end{aligned} \quad (27)$$

Выберем g_i так, чтобы выражения во всех круглых скобках (26) оказались равны нулю. При этом $g_2 = k_1$; $g_3 = k_1 k_2$; ...; $g_n = k_1 k_2 \dots k_{n-1}$. Подставляя g_i в (26) и разделив уравнение (26) на T_1 , получим:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(\mathbf{X}) &= \dot{x}_1 + \frac{k_1 T_2}{T_1} \dot{x}_2 + \frac{k_1 k_2 T_3}{T_1} \dot{x}_3 + \dots + \\ &+ \frac{k_1 k_2 \dots k_{n-1} T_n}{T_1} \dot{x}_n = \frac{k_1 k_2 \dots k_n}{T_1} u. \end{aligned} \quad (28)$$

Проверим условие (5): $0 \leq \frac{k_1 k_2 \dots k_n}{T_1}$, которое всегда выполняется. Можно показать [4], что условие (5) при $|f(\mathbf{X})| = 0$ соответствует (в отличие от "комбайновых" критериев) одновременно двум различным критериям — и критерию точности, и энергосберегающему критерию минимума расхода "сигнала управления", который присутствует в "комбайновом" критерии обобщенной работы А. А. Красовского.

Остается записать оптимальное управление в реальных координатах:

$$u = \text{sign}(x_{1\text{зад}} - \psi)$$

или

$$u = \text{sign} \left(x_{1\text{зад}} - x_1 - \frac{k_1 T_2}{T_1} x_2 - \frac{k_1 k_2 T_3}{T_1} x_3 - \dots - \frac{k_1 k_2 \dots k_{n-1} T_n}{T_1} x_n \right). \quad (29)$$

На рис. 2 приведены результаты моделирования объекта третьего порядка вида (25) при $T_1 = 1$; $T_2 = 2$; $T_3 = 1$; $k_1 = k_2 = k_3 = 1$, описываемого уравнениями:

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \quad \dot{x}_2(t) + 0,5x_2 = 0,5x_3; \quad \dot{x}_3(t) + x_3 = u. \quad (30)$$

В этом случае закон управления (29) объектом (30) принимает вид

$$u = \text{sign} \left(x_{1\text{зад}} - x_1 - \frac{k_1 T_2}{T_1} x_2 - \frac{k_1 k_2 T_3}{T_1} x_3 \right). \quad (31)$$

Из рис. 2 следует, что при управлении (31) с линейными обратными связями переходные процессы в замкнутой системе (30), (31) имеют апериодический характер, при этом время переходного процесса не превышает время при управлении по нелинейному закону, определенному в работе [1] по методу АКАР.

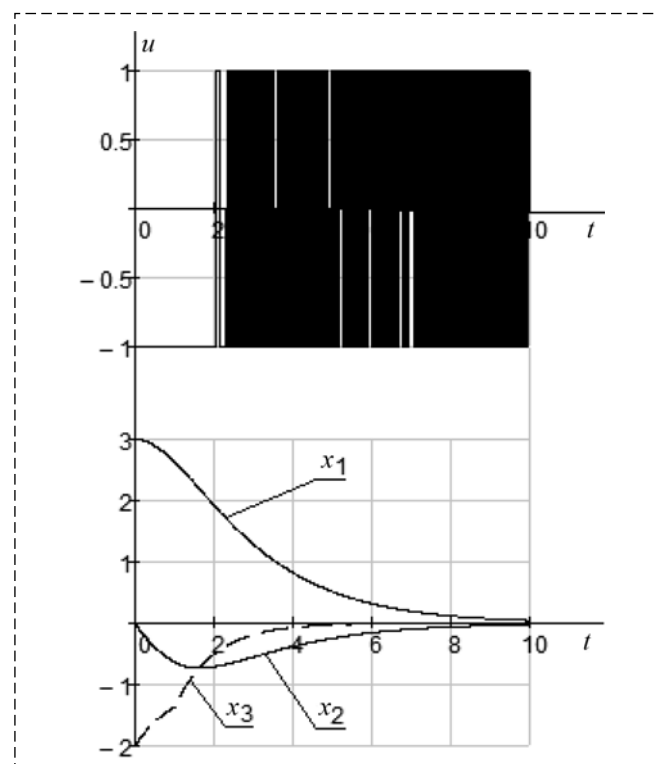


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе (30), (31)

Рассмотренный здесь подход к многокритериальной оптимизации (в смысле удовлетворения одновременно нескольким разным критериям) системы управления объектом (19) опирается на применение АКОР по критерию точности с энергосберегающим критерием минимума расхода "сигнала управления".

Заключение

В работе продолжено сравнение методов АКАР и АКОР, начатое в работе [1], на конкретных примерах синтеза систем. Показана существенная разница в подходах к аналитическому синтезу законов управления: в отличие от известных методов АКОР в исследуемом на примерах методе АКОРТ определяется не оптимальное управление по методу Беллмана, а в уже известном по методу Беллмана релейном оптимальном управлении по критерию точности регулирования определяется соответствующая этому оптимальному управлению функция переключения. Исходя из физического принципа работы оптимальной системы по критерию точности с помощью метода декомпозиции процесс управления разделяют на n интервалов, на каждом из которых существуют непрерывные частные производные функции Беллмана и, следовательно, функциональные уравнения на каждом интервале справедливы. По сравнению с методом АКАР в исследуемом методе АКОРТ оптимизирующий функционал является реальным и конкретным физическим критерием качества. Синтезируемые законы управления по критерию точности регулирования также могут обеспечить многокритериальную (одновременную, но не "комбайновую") оптимизацию переходных процессов в системе: оптимальные по точности и одновременно по быстродействию при знаке равенства в условии (5), либо

по точности и одновременно по расходу энергии при $f(\mathbf{X}) = 0$ в условии (5), либо только по точности с неопределенным расходом сигнала управления при $|f(\mathbf{X})| \leq \varphi(\mathbf{X})$. За счет появления в системе скользящих режимов обеспечивается двукратная инвариантность как к любым (в том числе случайным) внешним воздействиям (помехам), в том числе и к моменту нагрузки, так и к изменениям параметров объекта управления. На примерах синтеза проиллюстрированы явные преимущества метода АКОРТ как в отношении простейших и заранее известных (не эвристических) процедур аналитического конструирования законов управления для нелинейных объектов, так и в отношении обоснованности аналитического определения параметров регуляторов в зависимости от степени быстродействия оптимального по точности регулирования в замкнутой системе. Главная отличительная особенность метода АКОРТ — оптимальная точность регулирования.

Список литературы

1. Колесников А. А., Колесников Ал. А., Кузьменко А. А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 10. С. 657–669.
2. Филимонов Н. Б. Методологический кризис "всепобеждающей математизации" современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5. С. 291–299.
3. Сухинин Б. В., Сурков В. В. К вопросу о методологическом кризисе современной теории оптимального управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 1. С. 26–30.
4. Сурков В. В., Сухинин Б. В., Ловчаков В. И., Феофилов Е. И. Оптимальные управления в релейных системах // Известия вузов. Электромеханика. 2002. № 6. С. 29–35.
5. Сурков В. В., Сухинин Б. В., Ловчаков В. И., Соловьев А. Э. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по критериям точности, быстродействию, энергосбережению. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 300 с.
6. Сухинин Б. В., Сурков В. В., Цырук С. А., Феофилов Е. И. Оптимальное по точности (быстродействию, энергосбережению) управление электромеханическими объектами: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 140 с.

To the Question on the ADOR and the ADAR Methods in the Problems of Synthesis of Nonlinear Control Systems

B. V. Sukhinin, eeo@uic.tula.ru, V. V. Surkov, vvs150747@mail.ru,
The Tula state university, Tula, 300012. Tula Branch, Russian Federation,

Corresponding author: Surkov Victor V., Dr. Sci.Tech., Professor, The Tula State University, Tula, 300012, Tula Branch, Russian Federation, e-mail: vvs150747@mail.ru

In the paper the authors to continue comparison of known methods of Analytical Design of the Optimum Regulators (ADOR) and Analytical Design of the Aggregated Regulators (ADAR), discussed in paper [1]. Their comparison with method ADOR by criterion of accuracy of regulating is resulted. It is shown that the ADOR method by criterion of accuracy possesses more considerable advantages connected with easier procedure of analytical design of the nonlinear laws of the optimal control — is direct on the equations of the control object, not demanding the solution of any differential equations or artificial introduction in consideration of any functions of transformation in the form of the aggregated macrovariables, and the most difficult mathematical procedure is differentiation of variables and substitution of the equations of control object. The main difference of method ADOR by criterion of accuracy in the theoretical plot from all known methods that this method gives absolutely exact solution, he reliably secures a zero error of regulating, and all factors of errors (on a position, speed, acceleration, jerk etc.) also are equal to zero.

Unlike known ADOR methods, in known Bellman's method relay optimum control by criterion of accuracy of regulating function of switching and corresponding to this optimum control is defined. The method of decomposition of control process on n control intervals is for this purpose applied, on each of which there is continuous partial derivative Bellman's function and, hence, the functional equations on each interval are fair. In an investigated method optimising functional is a real and concrete criterion of performance. Synthesised laws of control by criterion of accuracy of regulating also can provide multicriteria optimization of transients in system: optimum on accuracy and simultaneously optimum on fast operation, or optimum on accuracy and simultaneously optimum on an energy consumption. At the expense of emersion in system of zero-overshoot responses double invariance as to any (including, casual) to external affectings, and to changes of parametres of control object is provided. On synthesis examples clear advantages of method ADOR by criterion of accuracy of regulating as concerning the elementary procedures of analytical control laws design for nonlinear objects, and concerning validity of analytical definition of parametres of regulators depending on extent of fast operation of optimum regulating on accuracy in the closed system are illustrated.

Keywords: control design, nonlinear control systems, optimal control synthesis, ADOR method, decomposition, accuracy control theory

For citation:

Sukhinin B. V., Surkov V. V. To the Question on the ADOR and the ADAR Methods in the Problems of Synthesis of Nonlinear Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 579—586.

DOI: 10.17587/mau.19.579-586

References

1. Kolesnikov A. A., Kolesnikov A. A., Kuz'menko A. A. *Metody AKAR i AKOR v zadachah sinteza nelinejnyh sistem upravlenija* (The ADAR Method and Theory of Optimal Control in the Problems of Synthesis of the Nonlinear Control Systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 657—669 (in Russian).
2. Filimonov N. B. *Metodologicheskij krizis "vsepobezhdajushhej matematizacii" sovremennoj teorii upravlenija* (Methodological crisis of "all-conquering mathematization" modern control theory), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 291—299 (in Russian).
3. Sukhinin B. V., Surkov V. V. *K voprosu o metodologicheskom krizise sovremennoj teorii optimf'nogo upravlenija* (To the question on methodological crisis of the modern theory of optimum control), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 26—30 (in Russian).
4. Surkov V. V., Sukhinin B. V., Lovchakov V. I., Feofilov E. I. *Optimal'nye upravlenija v relejnyh sistemah* (Optimum of control in relay systems), *Izvestija vuzov. Jelektromehanika*, 2002, no. 6, pp. 29—35 (in Russian).
5. Surkov V. V., Sukhinin B. V., Lovchakov V. I., Solov'ev A. Je. *Analiticheskoe konstruirovanie optimal'nyh reguljatorov po kriterijam tochnosti, bystrodejstviju, jenergosberezheniju* (Analytical's constraction of optimum regulators by criteria of accuracy, speed, power savings), Tula, Publishing house of TulGU, 2005, 300 p. (in Russian).
6. Surkov V. V., Sukhinin B. V., Tsyrjuk S. A., Feofilov E. I. *Optimal'noe po tochnosti (bystrodejstviju, jenergosberezheniju) upravlenie jelektromehanicheskimi ob'ektami* (Optimal by accuracy (speed, power savings) control of electromechanical objects), Tula, Publishing house of TulGU, 2014, 140 p. (in Russian).

С. В. Феофилов, д-р техн. наук, доц., svfeofilov@mail.ru, А. В. Козырь, аспирант, Kozyr_A_V@mail.ru, Тульский государственный университет, г. Тула

Анализ периодических движений в цифровых автоколебательных системах управления¹

Статья посвящена исследованию релейных систем с цифровым управлением. Автоколебания в таких системах являются рабочим режимом. Дискретизация по времени оказывает существенное влияние на параметры периодических колебаний. В работе предлагается точный метод анализа периодических режимов в цифровых автоколебательных системах управления с двухпозиционным релейным элементом. Предлагаемый подход распространяет метод фазового годографа на класс систем, работающих в дискретном времени. Представлен метод получения фазового годографа для случая автоколебательных систем с дискретизацией по времени и линейным объектом управления. В работе предлагается численно-аналитическая процедура построения семейства фазовых годографов дискретной релейной системы как в частотной области, так и во временной.

Данный подход позволяет выделить все возможные симметричные периодические движения в рассматриваемых системах. Частотный подход основан на выделении непрерывного линейного объекта и дискретной управляющей части. Выходной сигнал с цифровой части в периодическом режиме можно разложить в дискретный ряд Фурье. Это позволяет с учетом линейности объекта управления получить аналитические зависимости для выходного сигнала непрерывной части. Дискретизация системы управления приводит к некоторому запаздыванию переключения реле в периодическом режиме по сравнению с непрерывным случаем. На основе разработанного в статье метода можно определить все симметричные периодические колебания в релейных системах с дискретизацией по времени. По аналогии с данным методом предлагается подход к получению семейства фазовых годографов для таких систем во временной области. Подход основан на рассмотрении объекта управления в пространстве состояний. Фазовый годограф определяется с помощью решения матричного уравнения. Обсуждаются вопросы оценки устойчивости и области притяжения предельных циклов. Дается оценка влияния дискретизации на периодические процессы при неустойчивом объекте управления. Показано, что в таком случае в системе возникают микрохаотические колебания. На примере упрощенной модели пневматического привода приводятся результаты анализа влияния дискретизации на параметры периодических режимов работы системы.

Ключевые слова: автоколебания, релейное управление, дискретные системы, предельный цикл, метод фазового годографа, релейно-импульсные системы

Введение

Классический подход к проектированию регуляторов для релейных автоколебательных систем управления (PCY) основан на исследовании систем, работающих в непрерывном времени. Однако в настоящее время такие регуляторы в основном имеют цифровую реализацию. При этом дискретизация по времени может существенно изменить параметры периодического режима, в том числе привести к срыву автоколебательного процесса. Первые теоретические результаты, посвященные исследованию нелинейных импульсных систем, основывались на методе фазовой плоскости [1]. Полученные методы представляют собой достаточно сложную вычислительную процедуру и в большинстве случаев применимы лишь к системам второго порядка. В работах [1, 2] в различных вариантах был предложен точный метод определения возможных периодических движений в нелинейных дискретных системах. Данные методы были основаны на численном решении систе-

мы нелинейных уравнений, где порядок системы определялся числом тактов дискретизации на периоде возможных колебаний. Данный подход связан с серьезными вычислительными трудностями и не дает явной зависимости параметров колебаний от параметров дискретной системы. К исследованию симметричных периодических режимов, возможных в нелинейных импульсных системах, в работах [3, 4] был применен метод гармонического баланса с определенными изменениями. Метод фазового годографа также применялся к исследованию цифровых автоколебательных следящих систем [5, 6]. Однако предложенный подход в неполной мере позволял учесть все специфические особенности, возникающие в автоколебательных системах при введении импульсного элемента.

При проектировании цифровых автоколебательных систем на этапе синтеза корректирующих устройств важно точно оценивать влияние цифровой реализации на качество работы системы. Необоснованный выбор частоты дискретизации при проектировании автоколебательной системы может существенно ухудшить качественные показатели PCY. В настоящей работе предлагается распространение подхода, используемого в методе фазового го-

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-08-01141).

дографа, на класс автоколебательных систем управления с цифровым управлением.

Работа состоит из нескольких частей. В следующем разделе представлена математическая постановка исследуемой проблемы.

Математическое описание исследуемых систем

В работе будут рассматриваться РСУ с линейным объектом управления (ОУ). Структурная схема замкнутой системы управления приведена на рис. 1.

На рис. 1 ЭНП — экстраполятор нулевого порядка, ИЭ — импульсный элемент, РЭ — релейный элемент. На схеме функция $F(e[k])$ задает статическую характеристику двухпозиционного РЭ с гистерезисом (рис. 2, а). На его вход подается последовательность $e[kT_s] = f[kT_s] - y[kT_s]$, $k = 0, 1, 2, \dots$, где $f[kT_s]$ — дискретный входной сигнал. Сигнал обратной связи формируется путем дискретизации непрерывного выходного сигнала $y(t)$ с постоянным шагом квантования T_s . На объект управления в каждый интервал времени t , $kT_s \leq t < (k+1)T_s$, $k = 0, 1, 2, \dots$, поступает сигнал $U(t) = U[k]$. Математическая модель замкнутой системы может быть представлена в пространстве состояний

$$\begin{cases} \mathbf{x}[(k+1)T_s] = \Phi \mathbf{x}[kT_s] + \Psi U[k]; \\ y[kT_s] = C^T \mathbf{x}[kT_s], \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор фазовых переменных.

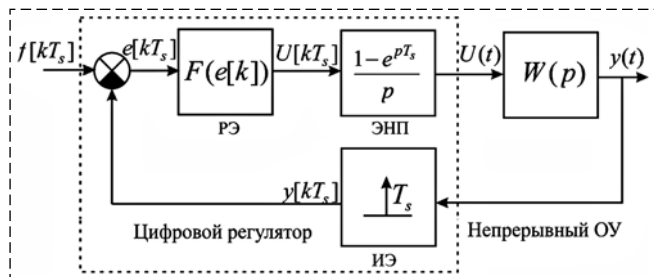


Рис. 1. Релейная автоколебательная система с цифровым управлением

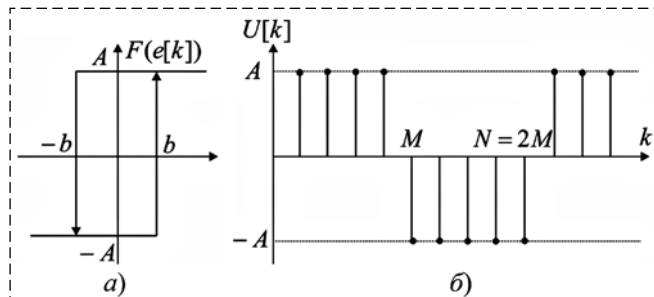


Рис. 2. Статическая характеристика (а) и выходной сигнал релейного элемента (б)

Матрицы системы определяются известными соотношениями:

$$\Phi = e^{AT_s}, \Psi = \int_0^{T_s} e^{A(T_s-s)} B ds, \quad (2)$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ — матрицы соответствующих размерностей непрерывного ОУ.

Дискретную передаточную функцию ОУ можно записать как

$$H(z) = (1 - z^{-1}) Z \left\{ L^{-1} \left\{ \frac{1}{p} W(p) \right\} \right\}. \quad (3)$$

Далее, для систем со структурной схемой, представленной на рис. 1, и математическим описанием (1)—(3) будем использовать термин "дискретная релейная система".

Частотный подход к определению фазового годографа дискретной релейной системы

Предположим, что в системе существует симметричный предельный цикл с периодом $N = 2M$.

В дискретной системе выходную последовательность с РЭ в периодическом режиме можно представить в виде решетчатой функции (рис. 2, б):

$$\begin{cases} U[k] = A, & \text{при } k = 1 + mN, 2 + mN, \dots, M + mN; \\ U[k] = -A, & \text{при } k = M + 1 + mN, \dots, N + mN, \\ m = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

Разложим периодический сигнал (4) в ряд Фурье [7]:

$$U[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n e^{jn\omega_0 k}, \quad (5)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi}{N}$, комплексный коэффициент C_n вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} C_n &= \sum_{k=1}^N U(k) e^{-jn\omega_0 k} = \\ &= \sum_{k=1}^M e^{-\frac{j\pi n k}{M}} - \sum_{k=M+1}^N e^{-\frac{j\pi n k}{M}} = A_1 - A_2; \\ A_1 &= \sum_{n=1}^M e^{-\frac{j\pi n k}{M}} = \frac{j e^{-j\pi n/N}}{\sin\left(\frac{\pi}{N} n\right)}; \\ A_2 &= \sum_{n=M+1}^N e^{-\frac{j\pi n k}{M}} = \frac{e^{-\frac{j\pi n(M+1)}{M}}}{e^{-\frac{j\pi n}{M}}} = (-1)^n A_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, в данном случае при четных значениях n коэффициент C_n равен нулю:

$$C_n = (1 - (-1)^n) \frac{j e^{-j\pi n/N}}{\sin\left(\frac{\pi}{N} n\right)}. \quad (7)$$

Найдем сигнал на выходе непрерывной части при воздействии на вход дискретной последовательности (5):

$$y[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W(\mathbf{e}^{in\omega_0}) C_n \mathbf{e}^{in\omega_0 k} = \frac{i}{N} \sum_{n=1}^N (1 - (-1)^n) W(\mathbf{e}^{in\omega_0}) \frac{\mathbf{e}^{-j\pi n/N}}{\sin\left(\frac{\pi}{N} n\right)} \mathbf{e}^{\frac{2ink}{N}}. \quad (8)$$

По аналогии с непрерывным случаем [2] введем понятие фазового годографа дискретной релейной системы. Компоненты фазового годографа называются R -характеристиками, являются функциями полупериода колебаний и определяют значения фазовых переменных в момент переключения релейного элемента с минуса на плюс. Таким образом, фазовым годографом дискретной релейной системы будем называть векторную функцию $\mathbf{x}^*(M)$, зависящую от параметра M и выделяющую все симметричные периодические движения.

Так как в периодическом движении наблюдается симметрия $y[0] = -y[MT_s]$, то с учетом (8) имеем:

$$\begin{aligned} y^*[M] &= \frac{i}{N} \sum_{n=1}^N (1 - (-1)^n) W(\mathbf{e}^{in\omega_0}) \frac{\mathbf{e}^{-j\pi n/N}}{\sin\left(\frac{\pi}{N}n\right)} \mathbf{e}^{\frac{2inM}{N}} = \\ &= \frac{i}{N} \sum_{n=1}^N (1 - (-1)^n) W(\mathbf{e}^{in\omega_0}) \frac{\mathbf{e}^{-j\pi n/N}}{\sin\left(\frac{\pi}{N}n\right)} \mathbf{e}^{\frac{2in0}{N}} \mathbf{e}^{in\pi} = -y^*[0]. \end{aligned}$$

Окончательное выражение для R -характеристики выходной координаты можно представить в виде

$$y^*[M] = \frac{-1}{M} \sum_{n=1}^M \frac{(1 - (-1)^n)}{\sin\left(\frac{\pi}{2M}n\right)} \times \text{Im} \left(W(\mathbf{e}^{\frac{in\pi}{M}}) \mathbf{e}^{-in\pi(M-0.5)/M} \right). \quad (9)$$

Условие переключения РЭ в дискретной системе отличается от непрерывного случая. В непрерывной РСУ автоколебания определяются из условия принадлежности траектории $y(t)$ по-

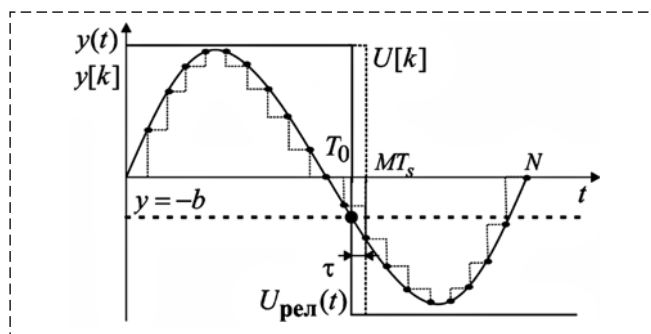


Рис. 3. К определению условия переключения в дискретной РСУ

верхности переключения $y^*(t) = -b$ в момент времени t^* . Однако в дискретном случае решетчатая функция $y[k]$ может переключить реле только в моменты времени, кратные целому значению интервала дискретизации $MT_s \geq t^*$. На рис. 3 представлено графическое условие переключения РЭ в дискретной системе $U[k]$ и в непрерывном случае $U_{\text{ред}}(t)$.

Таким образом, в дискретной РСУ по сравнению с непрерывным случаем переключение релейного элемента происходит с некоторой временной задержкой $\tau \in [0, T_s]$. Учесть такую задержку можно, введя эквивалентное фазовое запаздывание в непрерывную часть системы, рассмотрев модифицированную передаточную функцию

$$W_M(jn\omega_0, \tau) = A_n e^{i\left(\varphi_n - n\omega_0 \frac{\tau}{T_s}\right)}, 0 < \tau < T_s,$$

где $A_n = |W_M(z)|_{z=e^{jn\omega_0}}$ — амплитудно-частотная характеристика объекта управления, $\varphi_n = \arg(H(z))|_{z=e^{jn\omega_0}}$ — фазовая частотная характеристика.

С учетом этого фазовый годограф дискретной релейной системы будет иметь вид

$$y^*[M, \tau] = \frac{-1}{M} \sum_{n=1}^M \frac{(1 - (-1)^n)}{\sin\left(\frac{\pi}{2M} n\right)} \times \times \text{Im}(W_-(jn\omega_0, \tau) \mathbf{e}^{-i\pi n(M-0.5)/M}). \quad (10)$$

Для определения периодических движений в дискретной релейной системе необходимо построить семейство фазовых годографов по зависимости (10), изменяя τ от 0 до T_s . Все точки $y^*[M, \tau]$, лежащие на прямой $y^* = -b$, будут определять возможные полупериоды колебаний M и соответствующие им задержки τ . Аналогично представленному методу можно предложить подход к определению всех возможных периодических движений во временной области.

Фазовый годограф дискретной релейной системы во временной области

Как и ранее, предположим, что в дискретной РСУ имеется простой симметричный периодический режим с периодом $N = 2M$. Состояние дискретной системы, при котором происходит переключение реле с минуса на плюс, обозначим как $\mathbf{x}^*[0]$. Поскольку периодический режим симметричный, то

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}^*[0 + M] = \\ & = -\mathbf{x}^*[0] = \Phi^M \mathbf{x}^*[0] - (\Phi - \mathbf{I})^{-1}(\Phi^M - \mathbf{I})\Psi U_{\text{рел}}; \\ & \mathbf{x}^*[0] = (\Phi^M + \mathbf{I})^{-1}(\Phi^M - \mathbf{I})(\Phi - \mathbf{I})^{-1}\Psi U_{\text{рел}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Движение системы на полупериоде определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[M-1] &= \Phi^M \mathbf{x}^*[k] - \sum_{j=0}^{M-1} \Phi^j \Psi U_{\text{рел}} = \\ &= \Phi^M \mathbf{x}^*[k] - (\Phi - \mathbf{I})^{-1}(\Phi^M - \mathbf{I})\Psi U_{\text{рел}}, \quad (12) \\ & k = 0 \dots M. \end{aligned}$$

Отличительной особенностью исследования предельного цикла в дискретных релейных системах является то, что состояние системы в момент переключения реле может не принадлежать поверхности переключения, а находиться в некоторой окрестности. Таким образом, все возможные предельные циклы, возникающие в таких системах, определяются системой условий

$$\begin{cases} \mathbf{Cx}^*[M] \geq -b; \\ \mathbf{Cx}^*[M-1] < -b. \end{cases} \quad (13)$$

Алгоритм поиска всех возможных периодических движений можно представить следующей последовательностью действий. Задается вектор полупериода $M = (1, n)$. Для каждого значения M вычисляется $\mathbf{x}^*[0]$, с использованием выражения (11). С помощью равенства (12) определяется состояние системы через M тактов. Если условие (13) выполняется, то в системе возможны свободные симметричные периодические движения с периодом $N = 2MT_s$. Если в непрерывных РСУ автоколебания определялись единственной точкой $\mathbf{Cx}^*(T_0)$, то в дискретном случае предельный цикл определяется двумя точками $\mathbf{Cx}^*[M]$ и $\mathbf{Cx}^*[M-1]$. Таким образом, при определении возможных свободных колебаний в дискретной релейной системе по непрерывной модели необходимо учитывать фазовое запаздывание, вызванное дискретизацией:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{e}^{A(t-\varepsilon T_s)} \mathbf{x}[kT_s], \\ k &= (0, 1, 2, \dots, 0 < \varepsilon < 1), \quad t = kT_s + \varepsilon T. \end{aligned}$$

При $\varepsilon = 0$ $\mathbf{Cx}^*[kT_s] = \mathbf{Cx}^*(T_0)$; если $\varepsilon = 1$ $\mathbf{Cx}^*[kT_s] = \mathbf{C}[(\mathbf{e}^{AT_s})^{-1} \mathbf{x}^*(T_0)]$. Учитывая, что $\mathbf{e}^{AT_s} = \Phi$, можно записать равенство

$$\mathbf{Cx}^*(T_0, \varepsilon) = \mathbf{Cx}^*(T_0)\varepsilon + \mathbf{C}(1 - \varepsilon)\Phi^{-1}\mathbf{x}^*(T_0) = -b. \quad (14)$$

Для определения всех возможных периодических движений в дискретной РСУ необходимо построить семейство фазовых годографов в зависимости от $0 < \varepsilon < 1$ и определить все точки пересечения с прямой $\mathbf{Cx}^*(T_0, \varepsilon) = -b$. Точки, принадлежащие сетке дискретизации, будут соответствовать возможным периодам автоколебаний в дискретной РСУ.

Для того чтобы такие колебания наблюдались в РСУ, необходимо, чтобы они были устойчивыми.

Устойчивость автоколебаний в дискретной релейной системе

Анализ, представленный в предыдущем разделе, позволяет определить только возможные предельные циклы дискретных РСУ. Эти периодические движения могут быть устойчивыми либо неустойчивыми, причем оценка устойчивости в дискретном случае имеет существенные особенности.

В непрерывном случае асимптотическая орбитальная устойчивость автоколебаний сводится к исследованию устойчивости тривиального решения линейного разностного уравнения

$$\Delta \mathbf{x}[k+1] = \mathbf{G} \Delta \mathbf{x}[k]. \quad (15)$$

Устойчивость разностного уравнения определяется по собственным числам λ_i матрицы $\mathbf{G}$, и если выполняется условие

$$|\lambda_i| < 1, \quad i = 1, m, \quad (16)$$

то соответствующее периодическое решение $\mathbf{x}(t)$ является асимптотически орбитально устойчивым [2].

В случае цифровых РСУ релейный элемент переключается только в моменты времени, кратные целому значению T_s , а возмущение в начальных условиях $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) + \Delta$ может не приводить к изменению момента переключения РЭ. Такая ситуация показана на рис. 4.

На рис. 4 t_1, t_1^* — моменты переключения невозмущенной траектории $y(t)$ и возмущенной траектории $\tilde{y}(t)$ соответственно. Выходной сигнал с РЭ $U[k]$ переключается в момент времени MT_s , так же как и в случае невозмущенной траектории.

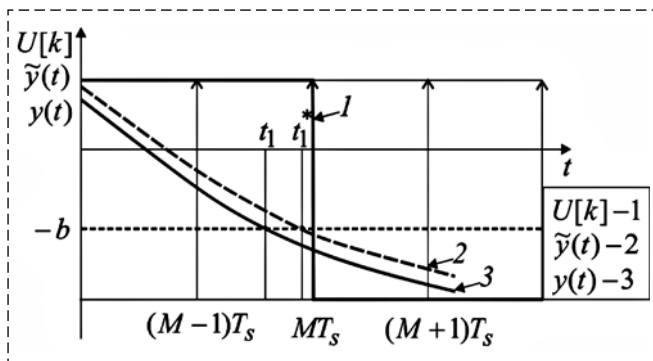


Рис. 4. Периодическая траектория возмущенной и невозмущенной систем

Исходное периодическое решение $y(t) = \mathbf{C}^T \mathbf{x}(t)$ пересекает поверхность переключения $x(t) = -b$ в момент времени $t = t_1$. Дадим малое возмущение Δ периодической траектории $y(t)$. Предположим, что возмущенная периодическая траектория $\tilde{y}(t) = \mathbf{C}^T (\mathbf{x}(t) + \Delta)$ пересечет поверхность переключения в момент времени $t = t_1^*$. Если оба решения пересекают поверхность переключения в пределах одного и того же интервала выборки

$$t_1 \wedge t_1^* \in ([M-1], M)T_s, \quad (17)$$

реле переключится в один и тот же момент времени MT_s как в случае невозмущенной траектории, так и в случае малого возмущения Δ (рис. 4). Если условия (17) будут выполняться для последующих переключений, то траектория системы будет асимптотически сходиться к предельному циклу.

Если в дискретной системе существует устойчивый предельный цикл, то для него существует некоторая область возмущений Δ , в которой управляющий сигнал $U[k]$ не изменится. Для анализа устойчивости периодической траектории в РСУ необходимо оценить множество значений Δ , при котором будет выполняться условие (17).

Область допустимых возмущений, при которых не происходит смещение моментов переключения РЭ, можно представить в следующем виде. Предположим, что в релейной системе существует симметричный предельный цикл с периодом NT_s , причем матрица ОУ $\mathbf{A}$ — матрица Гурвица. Тогда все решения с начальными условиями $\tilde{\mathbf{x}}_N = \mathbf{x}_N^* + \Delta$, где $\Delta \in \mathbf{D}$, будут асимптотически сходиться к устойчивому предельному циклу. Множество допустимых значений $\Delta \in \mathbf{D} = \mathbf{D}_U \cap \mathbf{D}_L \cap \mathbf{D}_I$ определяется следующей системой неравенств:

$$D_U = \{\Delta \in \mathbb{R}^n: \inf_i ((-1)^{i+1} \mathbf{C}^T \mathbf{e}^{\mathbf{A} M T_s} \Phi^i \Delta + \mathbf{C}^T \mathbf{x}_N^* - b) \geq 0\}; \quad (18)$$

$$D_L = \{\Delta \in \mathbb{R}^n: \sup_i ((-1)^{i+1} \mathbf{C}^T \mathbf{e}^{\mathbf{A} (M+1) T_s} \Phi^i \Delta + \mathbf{C}^T \mathbf{x}_{N+1}^* - b) < 0\}; \quad (19)$$

$$D_I = \begin{cases} \{\Delta \in \mathbb{R}^n: \mathbf{C}^T (\mathbf{x}_N^* + \Delta) \geq b\}, & \text{если } U = A; \\ \{\Delta \in \mathbb{R}^n: \mathbf{C}^T (\mathbf{x}_N^* + \Delta) > -b\}, & \text{если } U = -A. \end{cases} \quad (20)$$

Таким образом, задача определения допустимого множества возмущений эквивалентна задаче определения множества достижимости дискретной системы. Метод нахождения этого множества представлен в работах [9, 10].

Пример: Анализ периодических колебаний в пневматическом приводе с цифровым управлением

В качестве примера рассмотрим упрощенную математическую модель пневматического привода, структурная схема которого приведена на рис. 5. В математической модели не учитываются жесткие механические ограничители по перемещениям управляющего электромагнита и исполнительного двигателя. Делается допущение о том, что эти устройства работают в линейной зоне.

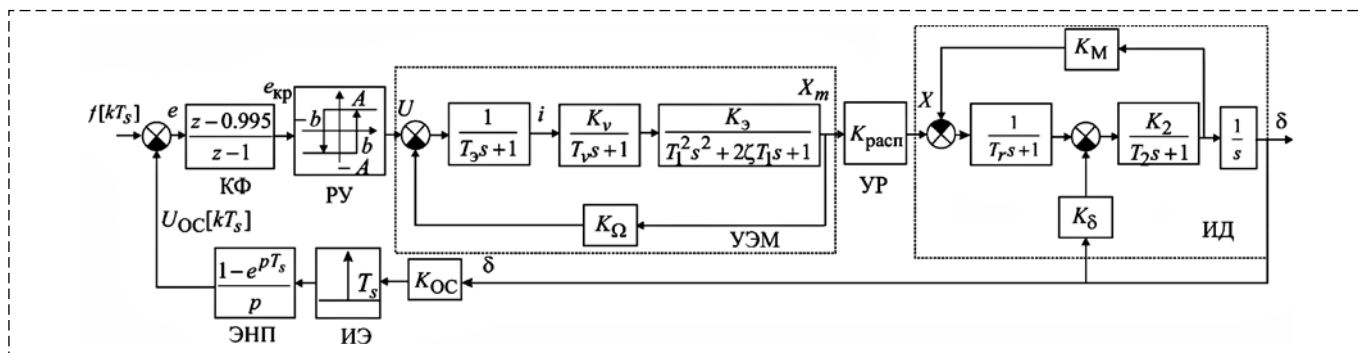


Рис. 5. Структурная схема рулевого привода

На схеме КФ — дискретное корректирующее устройство; РУ — релейный усилитель; УЭМ — управляющий электромагнит; УР — распределительное устройство; ИД — исполнительный двигатель, e — сигнал ошибки; K_{OC} — коэффициент обратной связи; U — сигнал с выхода релейного усилителя; X_m — сигнал с выхода управляющего электромагнита; X — ход распределительного устройства; δ — угол поворота рулей. Таким образом, в соответствии с рис. 1 в приводе можно выделить непрерывный линейный объект управления, включающий УЭМ, УР и ИД, а также цифровой регулятор, состоящий из КФ, РУ, K_{OC} , ИЭ, ЭНП.

Математическое описание объекта управления можно представить в пространстве состояний (1), где

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_v}{T_v} & -\frac{1}{T_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{2\xi}{T_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{расп}}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\frac{K_M}{T_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_2}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & \frac{K_\delta K_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; C = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1).$$

Здесь $T_3 = 0,0015$ (с); $K_\Omega = 5,1$; $T_v = 2,4 \cdot 10^{-4}$ (с); $K_1 = 0,05$; $T_1 = 6,782 \cdot 10^{-4}$ (с); $\xi = 0,0369$; $T_r = 0,0015$ (с); $K_M = 0,4207$; $K_{расп} = 396,67$; $K_2 = 1$; $K_\delta = [20; -20]$; $T_2 = 0,0346$ (с).

Рассматриваются два режима работы пневматического

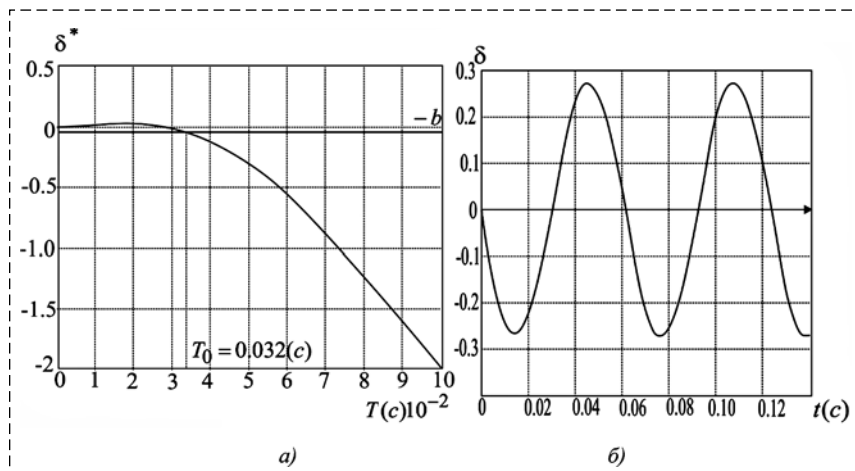


Рис. 6. Определение автоколебания в непрерывной системе (а), периодический сигнал на выходе системы $u(t)$ (период T_0) (б)

привода с цифровым управлением: случай с положительным шарнирным моментом $K_\delta = 20$ и отрицательным $K_\delta = -20$. В первом случае ОУ устойчив, во втором случае в разомкнутом состоянии ОУ теряет устойчивость.

В случае непрерывной замкнутой системы управления в автономной системе существует один устойчивый предельный цикл с частотой автоколебаний 16,08 Гц. В системе с отрицательным шарнирным моментом $K_\delta = -20$ наблюдается устойчивый предельный цикл с частотой 14,7 Гц. На рис. 6 представлено графическое определение периодического режима в непрерывной релейной системе и периодический выходной сигнал $\delta(t)$.

Определим все возможные периодические движения в системе с дискретизацией по времени. Период дискретизации $T_s = 0,002$ с (500 Гц). Используя зависимость (14), построим семейство фазовых годографов и определим периоды колебаний $2MT_s$, принадлежащих данной области. На рис. 7 показано определение всех возможных периодических движений в дискретной РСУ.

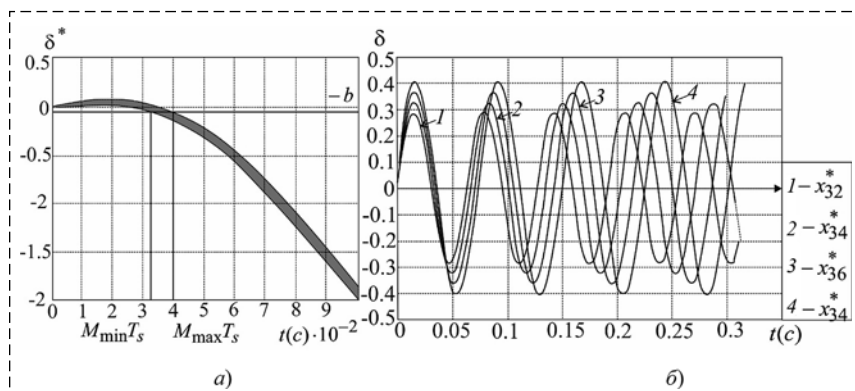


Рис. 7. Определение автоколебаний в дискретных РСУ. Семейство фазовых годографов в зависимости от задержки ϵ (а), периодический выходной сигнал (б)

Используя зависимость (11), можно определить начальные условия, принадлежащие каждому предельному циклу.

При цифровой реализации автоколебательной системы управления пневмоприводом в отличие от непрерывного случая в системе выявляются четыре предельных цикла с частотой от 15,6250 до 13,1579 Гц. В системе устанавливаются симметричные периодические колебания с периодом $2T_0 = NT_s$, $N = 32, 34, 36, 38$. Начальные условия, соответствующие каждому предельному циклу, следующие:

$$\begin{aligned} x_{32}^* &= (0,780 \ 3,978 \ 0,200 \ 49,682 \ 61,910 \ 30,275 \ 0,0191)^T; \\ x_{34}^* &= (0,780 \ 3,978 \ 0,200 \ -31,747 \ 69,409 \ 32,256 \ 0,037)^T; \\ x_{36}^* &= (0,780 \ 3,978 \ 0,189 \ 35,4273 \ 61,0104 \ 34,068 \ 0,0571)^T; \\ x_{38}^* &= (0,780 \ 3,978 \ 0,207 \ -24,087 \ 67,306 \ 35,823 \ 0,080)^T. \end{aligned}$$

Для каждого предельного цикла можно вычислить допустимую область возмущений, из которой будет обеспечиваться асимптотическая устойчивость полученного решения.

Такой разброс возможных колебаний необходимо учитывать при линеаризации привода по полезному сигналу. В случае, когда ОУ является устойчивым, РЭ может быть линеаризован эквивалентным коэффициентом усиления. Если в непрерывном случае РЭ можно заменить единственным коэффициентом передачи, то в дискретном случае он будет переменным. Кроме того, определение зоны возможных периодических колебаний важно при проектировании цифровой системы управления и обоснованном выборе производительности вычислителя.

Рассмотрим работу привода с отрицательным шарнирным моментом, когда $K_\delta = -20$.

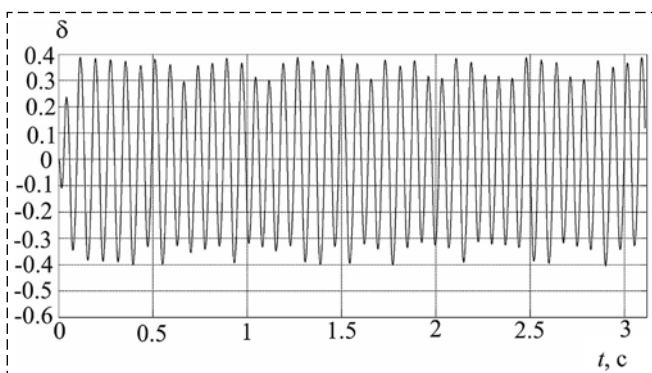


Рис. 8. Микрохаотические колебания в цифровой автоколебательной релейной системе управления

В таком случае матрица ОУ A не является матрицей Гурвица. В непрерывной системе управления устанавливается симметричный периодический процесс (см. рис. 5).

В цифровой РСУ вследствие квантования по времени могут возникать так называемые микрохаотические колебания [10]. На рис. 8 представлена автономная работа привода, когда $K_\delta = -20$ и частота дискретизации $T_s = 0,002$ с (500 Гц). Наибольший показатель Ляпунова для данной временной выборки является положительным, что говорит о том, что имеется хаотическая динамика [11]. При увеличении частоты дискретизации область хаотических колебаний будет уменьшаться и в пределе стремиться к предельному циклу в непрерывной системе.

Заключение

В работе были рассмотрены вопросы определения периодических режимов в дискретных автоколебательных системах управления с цифровым управлением. Предложены два подхода к определению всех возможных автоколебаний в таких системах на основе метода фазового годографа. Показано, что по сравнению с непрерывным случаем в дискретных автоколебательных релейных системах предельные циклы дробятся и образуют некоторое множество. Предлагается подход к определению гарантированной области устойчивости на основе решения системы неравенств. Рассмотрены процессы, протекающие в системе с неустойчивым ОУ. Показано, что в таких системах возникают микрохаотические колебания. Открытой темой для исследования остается вопрос линеаризации по полезному сигналу цифровых автоколебательных систем управления.

Список литературы

1. Цыпкин Я. З. Релейные автоматические системы. М.: Наука, 1974. 576 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т. 1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления // Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. С. 748.
3. Цыпкин Я. З., Попков Ю. С. Теория нелинейных импульсных систем. М.: Наука, 1973. 416 с.
4. Bazanella A. S. Limit cycles in sampled-data relay feedback systems / A. S. Bazanella, A. Parraga // IEEE Transactions on Automatic Control, Springer. 2016.
5. Феофилов С. В. Периодические движения в релейных системах с цифровым управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 5. С. 11–17.
6. Феофилов С. В., Козырь А. В. Периодические колебания в дискретных релейных системах управления //

7. Koch S. Frequency domain analysis of sampled variable structure systems / S. Koch, M. Horn // *IEEE 56th Annual Conference on Decision and control* December 12—15. 2017. P. 6664—6670.

8. Galias Z., Yu X. Euler's discretization of single input sliding-mode control systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 9, pp. 1726—1730, Sept 2007.

9. Galias Z., Yu X. Analysis of delayed sliding mode control systems under zero-order holder discretization, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 61, no. 9, pp. 2739—2744, Sept. 2016.

10. Gilbert E. G., Tan K. T. Linear systems with state and control constraints: the theory and application of maximal output admissible sets, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept. 1991, vol. 36, no. 9, pp. 1008—1020.

11. Kowalczyk P. Micro-chaos in relay feedback systems with bang-bang control and digital sampling // P. Kowalczyk, A. Glendinning, In: *IFAC. Italy* 2011.

Analysis of Periodic Motions in Digital Self-Oscillating Control Systems

S. V. Feofilov, svfeofilov@mail.ru, A. V. Kozyr, Kozyr_A_V@mail.ru,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation

Corresponding author: Feofilov Sergei V., Ph. D., Associate Professor,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: svfeofilov@mail.ru

Accepted on June 05, 2018

This paper is devoted to the investigation of relay systems with sample-data control. Self-oscillations in such systems are the operating mode. Time-sampling has a significant effect on the parameters of periodic oscillations. We propose an exact method for analyzing periodic regimes in digital self-oscillating control systems with a two-position relay element. The proposed approach extends the phase hodograph method to the class of systems operating in discrete time. A method for obtaining a phase locus for the case of self-oscillating systems with time-sampling and a linear control object is presented. The method for obtaining a phase locus for the case of self-oscillating systems with time-sampling and a linear control object is presented. The method for obtaining a phase locus for the case of self-oscillating systems with time sampling and a linear part is presented. The paper proposes a analytical procedure for constructing a family of phase locusers of a discrete relay system, both in the frequency domain and in the time domain. This approach makes it possible to isolate all possible symmetric periodic motions in the systems under consideration. The frequency approach is based on the allocation of a continuous linear object and a discrete control part. The output signal from the digital part in the batch mode can be decomposed into a discrete Fourier series. This allows obtaining analytical conditions for the output signal of the continuous part. The sampling of the control system causes a delay in the switching of the relay in a batch mode in comparison with the continuous case. The method allows to determine all symmetrical periodic oscillations in relay systems with time sampling. Similarly, we propose the approach of obtaining a family of phase travel curves for such systems in the time domain. The approach is based on the consideration of the control object in the state space. The approach is based on consideration in the state space of the control object. The phase locus is determined by solving the matrix equation. The stability and the attraction domain of limit cycles are discussed. The effect of sampling on periodic processes with an unstable control object is given. It is shown that in this case micro-chaotic oscillations arise in the system. An example is provided to demonstrate the application of the method.

Keywords: Self-oscillations, relay control, discrete systems, limit cycle, phase locus method, relay-pulse systems.

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-08-01141).

For citation:

Feofilov S. V., Kozyr A. V. Analysis of Periodic Motions in Digital Self-Oscillating Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 8, pp. 587—594.

DOI: 10.17587/mau.19.587-594

References

1. Tsypkin Ya. Z. Relay automatic systems, Moscow, Science, 1974, 576 p. (in Russian).

2. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 3-kh t.* T. 1: Analiz i statisticheskaya dinamika sistem avtomaticheskogo upravleniya, Pod red. N. D. Yegupova, Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2000, pp. 748 (in Russian).

3. Tsypkin Ya. Z., Popkov Yu. S. *Teoriya nelineynykh impul'snykh sistem.* Moscow, Nauka, 1973. 416 p. (in Russian).

4. Bazanella A. S., Parraga A. Limit cycles in sampled-data relay feedback systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Springer, 2016 (in Russian).

5. Feofilov S. V. Periodicheskiye dvizheniya v releynykh sistemakh s tsifrovym upravleniyem, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2006, no. 5, pp. 11—17 (in Russian).

6. Feofilov S. V., Kozyr' A. V. Periodicheskiye kolebaniya v diskretnykh releynykh sistemakh upravleniya, *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki*, Vyp. 12, CH. 3, g. Tula, Izd-vo TulGU, 2017, pp. 61—71 (in Russian).

7. Koch S., Horn M. Frequency domain analysis of sampled variable structure systems, *IEEE 56th Annual Conference on Decision and control*, December, 12—15, 2017, pp. 6664—6670.

8. Galias Z., Yu X. Euler's discretization of single input sliding-mode control systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept. 2007, vol. 52, no. 9, pp. 1726—1730.

9. Galias Z., Yu X. Analysis of delayed sliding mode control systems under zero-order holder discretization, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept. 2016, vol. 61, no. 9, pp. 2739—2744.

10. Gilbert E. G., Tan K. T. Linear systems with state and control constraints: the theory and application of maximal output admissible sets, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept. 1991, vol. 36, no. 9, pp. 1008—1020.

11. Kowalczyk P., Glendinning A. Micro-chaos in relay feedback systems with bang-bang control and digital sampling, In: *IFAC, Italy* 2011.

Ю. Н. Хижняков, д-р техн. наук, проф., luda@at.pstu.ru, А. А. Южаков, д-р техн. наук, проф., uz@at.pstu.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Д. А. Сулимова, dsulimova@list.ru,
АО "ОДК-СТАР", г. Пермь

Модификация многорежимного управления воздушным реактивным двигателем

В настоящее время широкое применение находит концепция многорежимного управления сложными регулируемы-ми объектами, ключевым понятием которой является анализатор динамических ситуаций. В статье предлагается замена данного анализатора регулятором состояний на примере управления воздушным реактивным двигателем. Состояние воздушного реактивного двигателя характеризуется следующими переменными: частота вращения свободной турбины (вентилятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления, давление и температура горения газа за камерой сгорания и т. д., которые являются проекциями вектора состояния, где рабочая точка в текущий момент времени перемещается по статической характеристике. Все переменные зависят от расхода топлива, его качества и синхронно изменяются в текущий момент времени. В настоящее время все перечисленные параметры воздушного реактивного двигателя регулируются отдельно, что является недостатком. Предлагается заменить линейные регуляторы перечисленных параметров одним регулятором состояния, который управляет дозатором воздушного реактивного двигателя. Задача адаптивного нечеткого регулятора состояний — изменять расход топлива дозатором в целях управления параметрами для реализации различных режимов работы воздушного реактивного двигателя с применением нейронечеткой технологии. Разработанная модель регулятора состояний отвечает требованиям системы реального времени, а также снижает аппаратные затраты на построение системы управления за счет исключения селектора.

Ключевые слова: воздушно-реактивный двигатель, датчики, дозатор, адаптивный нечеткий регулятор состояний, селектор

Введение

Решение сложных задач регулирования целесообразно основывать на декомпозиции общей задачи регулирования. Такая декомпозиция предполагает, что все многообразие движений системы разделяется на ряд режимов исходя из технических, технологических, динамических или функциональных признаков [1]. Следует различать режимы движения объекта и режимы регулирования. По существу, многорежимное управление рассмотрено в работах [2—8]. В работе [9] выдвинута концепция многорежимного регулирования, базирующаяся на понятии динамической ситуации, при которой происходит учет информативных признаков ситуации, формируемых на основе поступающей от измерительных датчиков информации о текущем состоянии объекта и характере неконтролирующих возмущений. В структуру многорежимного регулятора входит совокупность регуляторов для управления текущими параметрами регулируемого объекта и анализатор динамических ситуаций. В свою очередь, анализатор динамических ситуаций включает датчики контролируемых параметров объекта регулирования и неконтролируемых возмущений от внешней и внутренней сред, а также

оцениватели ситуации и формирователь сигнала переключений [1].

Многорежимное управление ВРД

Рассмотрим применение концепции многорежимного управления к воздушному реактивному двигателю (ВРД).

Эффективность любого летательного аппарата зависит от совершенства системы автоматического управления силовой установкой. Повышение надежности эксплуатации, экономия топлива, снижение эксплуатационных затрат силовых установок на базе ВРД, снижение их массы и стоимости делают актуальным создание комплексных систем управления, интегрируемых по аппаратуре и по способам управления ВРД [10—12].

ВРД есть нелинейный многорежимный объект с мерой неопределенности математического описания. Данный объект, имеющий один вход (дозирующее устройство) и n селективно управляемых выходов, подвержен влиянию внутренних возмущений (протечка разогретого топлива в дозаторе, изменение зазора в регуляторе сопло—заслонка дозатора и т. д.) и внешних неконтролируемых возмущений (от-

клонения температуры и давления воздуха от заданных значений по высоте и т. д.) [13, 14].

Штатное управление построено на предположении, что ВРД есть линейный объект (в малом) с математическим описанием в виде передаточных функций с переменными коэффициентами по всем контролируемым параметрам [15–17].

Цифровое управление ВРД не снимает проблемы, связанные с недетерминированностью (параметрической неопределенностью) объекта при работе в условиях помех. Необходимо учитывать инерционные свойства ВРД, гарантируемый запас устойчивости по модулю и фазе, применение адаптивных регуляторов, встроенных эталонных моделей ВРД и поведение системы управления в целом. При этом необходимо соблюдать требования системы реального времени (СРВ) в целях обеспечения функциональности и корректности при проектировании систем.

Состояние ВРД характеризуется следующими переменными: частота вращения свободной турбины (вентилятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления, давление и температура горения газа за камерой сгорания и т. д., которые являются проекциями вектора состояния. Рабочая точка в текущий момент времени перемещается по статической характеристике ВРД с изменением расхода топлива дозатором. Все переменные зависят от расхода топлива, его качества и синхронно изменяются в текущий момент времени. Анализатором динамических ситуаций и формирователем переключений сигналов здесь является селектор (асинхронный переключатель), подключающий дозатор к выходу регулятора параметра, вышедшего за допустимые пределы.

Постоянно растущая сложность и разнообразие задач, решение которых возлагается на автоматические системы, в последнее время определяют повышенную потребность в системах управления с более универсальными свойствами. Подходящим для решения большинства задач являются системы, основанные на нечеткой логике и нейронных элементах. Объединение элементов нечеткой логики и нейронных элементов позволяет реализовать "мягкие" вычисления в целях реализации адаптивных нечетких регуляторов [18].

По сравнению с традиционными методами анализа и вероятностным подходом адаптивное нечеткое управление позволяет решать задачи управления стохастическими объектами, получать результаты с заданной точностью, обеспечивать необходимое быстроедействие процессов управления, где нецелесообразно применять методы традиционной математики.

Учитывая назначение ВРД, необходимо рассмотреть его особенности при проектировании для повышения эффективности работы, вопросы селективности статических и динамических контуров, построения дозирующего устройства, диагностики работы оборудования.

В последнее десятилетие возникло несоответствие между достигнутым уровнем теории и новыми задачами развития теории управления ВРД [17, 18].

Известно, что автоматические системы управления можно разделить на два больших класса — неадаптивные и адаптивные. Работа неадаптивных систем основана на предположении, что внешние и внутренние условия работы системы изменяются в малых пределах.

Характерным признаком адаптивных систем является отсутствие полной информации об объекте управления, внешних возмущениях и граничных условиях, т. е. им присущ индетерминизм (неопределенность). Раскрытие неопределенности обеспечивается благодаря избыточности системы, логичности ее действия, прогнозированию ее состояния и анализу накапливаемой информации в целях самообучения.

К адаптивным системам можно отнести [19]:

- *экстремальные системы с нулевым заданием*, где поиск экстремума достигается с помощью формирования управляющих воздействий;
- *самонастраивающиеся системы*, где изменяются управляющие воздействия и параметры системы;
- *самоорганизующиеся системы*, где изменяются управляющие воздействия, параметры и структура системы;
- *обучающиеся системы*, где изменяются управляющие воздействия, параметры, структура, алгоритм функционирования, а в случае самообучения — и целевая функция.

Наиболее эффективными адаптивными системами являются аналитические активные замкнутые обучающиеся системы [20, 21].

На примере адаптивного нечеткого регулятора состояния ВРД рассмотрим возможность построения аналитических активных замкнутых обучающихся систем.

Модифицированный многорежимный регулятор состояния

В настоящее время все перечисленные параметры ВРД регулируются отдельно, что является недостатком. Предлагается заменить линейные регуляторы таких параметров, как частота вращения свободной турбины (венти-

лятор или компрессор низкого давления), частота вращения компрессора высокого давления, давления и температура горения газа за камерой сгорания и т. д., одним регулятором состояния, который управляет дозатором ВРД, т. е. реализовать многорежимный подход.

Задача адаптивного нечеткого регулятора состояний — изменять расход топлива дозатором для управления параметрами ВРД в заданных пределах и реализовать различные режимы работы ВРД. Учитывая отсутствие датчика расхода топлива, нельзя рассчитывать текущий расход топлива в функции текущих значений параметров ВРД. Данную проблему можно устранить применением прямых моделей для опосредованного расчета текущих значений расхода топлива в соответствии с текущим значением параметров ВРД.

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема модифицированного многорежимного управления объектом управления.

Для расчета параметров эталонных моделей ВРД нормируем их:

- частота вращения вентилятора

$$\sigma_1 = \frac{n_B}{n_{B \text{ ном}}};$$

частота вращения компрессора высокого давления

$$\sigma_2 = \frac{n_{TK}}{n_{TK \text{ ном}}};$$

температура горения газов за камерой сгорания

$$\sigma_3 = \frac{t}{t_{\text{ном}}}.$$

На рис. 2 приведен вариант модифицированного многорежимного управления с применением адаптивного нечеткого регулятора состояния.

На рис. 3 представлена структурная схема прямой модели по отдельному параметру (частота вращения вентилятора). Прямая модель реализует нейронечеткую технологию и включает адаптивный фаззификатор и блок активационных функций.

Терм-множество фаззификатора Φ содержит три линейных термина: a , b , c , как показано на рис. 4,

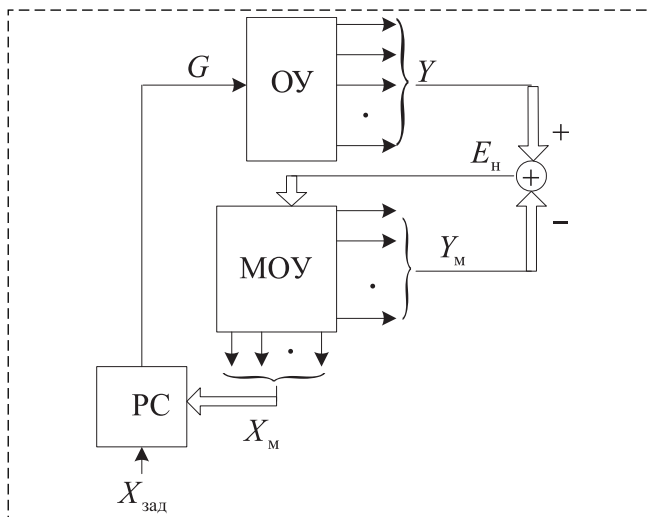


Рис. 1. Обобщенная структурная схема многорежимного управления объектом управления:

ОУ — объект управления; МОУ — модель объекта управления; РС — регулятор состояний; Y — вектор переменных выхода ОУ; Y_M — вектор переменных выхода МОУ; $X_{\text{зад}}$ — задание рабочей точки статической характеристики ОУ; X_M — вектор переменных обратных связей; G — текущее значение расхода топлива

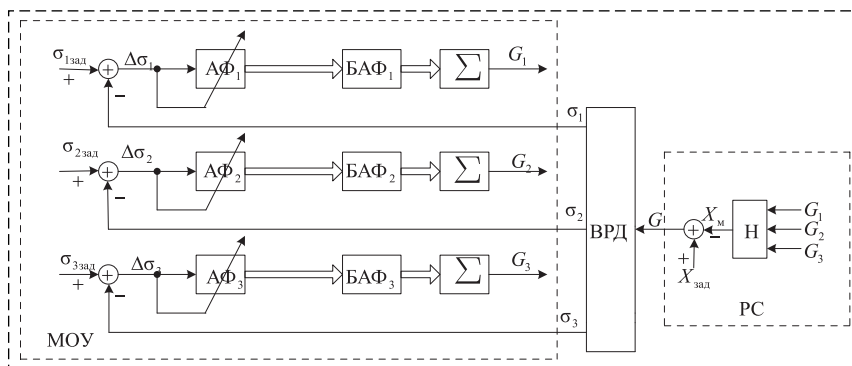


Рис. 2. Структурная схема модифицированного многорежимного управления ВРД:

$\Delta\sigma_{1\text{зад}}$, $\Delta\sigma_{2\text{зад}}$, $\Delta\sigma_{3\text{зад}}$ — значения переменных ВРД; $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ — отклонения переменных ВРД от заданных значений; АФ₁, АФ₂, АФ₃ — адаптивные фаззификаторы; БАФ₁, БАФ₂, БАФ₃ — блоки активационных функций; G_1 , G_2 , G_3 — выходы прямых адаптивных нечетких моделей переменных ВРД; G — расход топлива дозатора ТВД; Н — нормализатор сигналов G_1 , G_2 , G_3

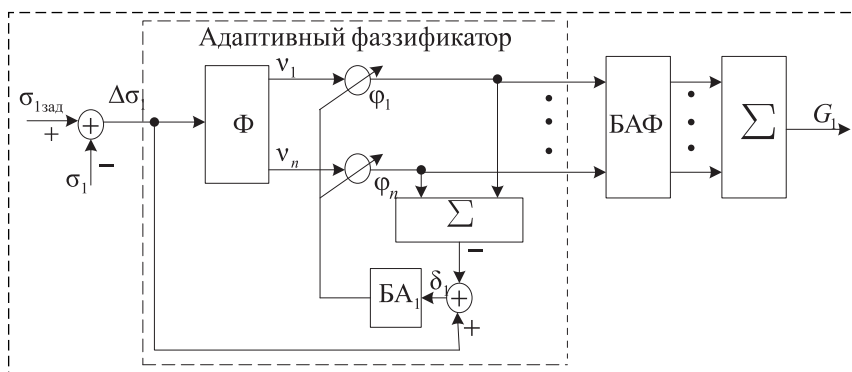


Рис. 3. Структурная схема прямой адаптивной нечеткой модели по текущему параметру:

Φ — фаззификатор; v_1 , v_2 , ..., v_n — степени принадлежности; ϕ_1 , ϕ_2 , ..., ϕ_n — синапсы адаптивного фаззификатора; БАФ — блок активационных функций; БА₁ — блок адаптации; δ_1 — функции невязки адаптивного фаззификатора

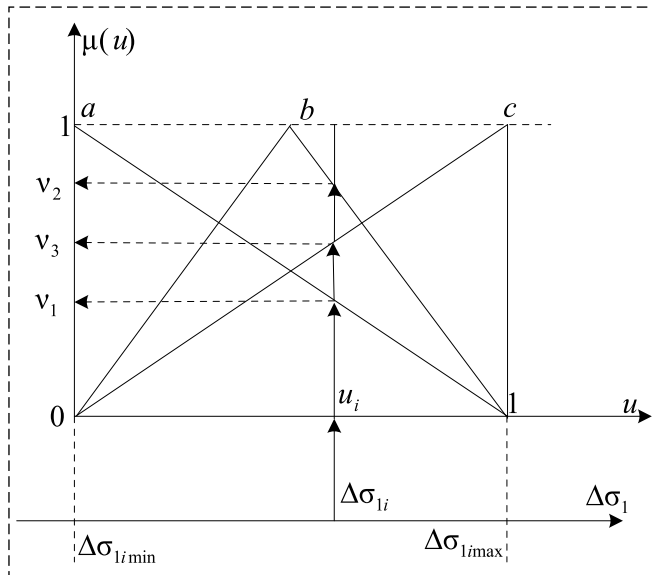


Рис. 4. Фаззификация отклонения входного сигнала от заданного значения

размещенных на интервале 0...1, где синглетон представлен пропорцией [22]

$$u_i = \frac{(\Delta\sigma_{li} - \Delta\sigma_{li\min})}{(\Delta\sigma_{li\max} - \Delta\sigma_{li\min})}.$$

Математическое описание терм-множества фаззификатора имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_1(u) &= 1 - u, u \in [0, 1]; \\ \mu_2(u) &= \begin{cases} 2u, u \in \left[0, \frac{1}{2}\right]; \\ 2(1 - u), u \in \left[\frac{1}{2}, 1\right]; \end{cases} \\ \mu_3(u) &= u, u \in [0, 1]. \end{aligned}$$

Согласно текущему значению $\Delta\sigma_i$ определяются степени принадлежности v_1, v_2, v_3 (рис. 4).

Адаптация фаззификатора выполнена на базе линейного нейрона с помощью алгоритма последовательного обучения на основании рекуррентной формулы [23, 24]

$$\varphi_{j+1} = \varphi_j + C_1 \delta_{lj} \frac{\Delta\sigma_{lj}}{\Delta\sigma_{lj}^T \Delta\sigma_{lj}},$$

где φ_{j+1} — последующий $(j+1)$ -й шаг итерации; φ_j — предыдущий j -й шаг итерации; $\Delta\sigma_{lj}$ — дискретная форма j -итерации входного сигнала; $\Delta\sigma_{lmj}$ — оценка выхода модели; $\delta_{lj} = (\Delta\sigma_{lj} - \Delta\sigma_{lmj})$ — ошибка в оценке $\Delta\sigma_{lj}$; T — транспонирование; C_1 — коэффициент коррекции.

Цель адаптации степеней принадлежности фаззификатора — обеспечить сумму текущих

значений синапсов равной текущему отклонению, в котором отражается текущее состояние системы в целом.

Блок активационных функций (БАФ) включает активационные функции на базе гиперболического тангенса. Данная функция знакопеременная, ослабляет сильные и усиливает слабые входные сигналы [25–28].

Математическое описание прямых адаптивных нечетких моделей по другим текущим параметрам (частота вращения компрессора высокого давления и температуры горения газов в камере сгорания) аналогично математическому описанию прямой адаптивной нечеткой модели по частоте вращения вентилятора ТВД.

Для определения результирующего расхода топлива дозатором адаптивным нечетким регулятором состояния вводится нормализатор N сигналов (см. рис. 2) с последующим их суммированием и усреднением

$$G = X_{\text{зад}} - X_m,$$

$$\text{где } X_m = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{3}.$$

Заключение

1. Для реализации предлагаемого модифицированного многорежимного управления ВРД необходимо измерять все текущие параметры.
2. Разработка моделей ВРД по текущим параметрам эффективна с применением нейро-нечеткой технологии.
3. Формирование прямых моделей по текущим параметрам необходимо выполнять в пределах одного такта с учетом требований систем "реального времени".
4. Модифицированное многорежимное управление ВРД обеспечивает высокое качество управления и снимает аппаратные затраты на построение системы управления за счет исключения селектора.

Список литературы

1. Филимонов Н. Б. Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Известия высших учебных заведений "Приборостроение". 1988. Т. XXXI, № 2. С. 18–33.
2. Жук К. Д., Тимченко А. А., Доленко Т. И. Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наукова думка, 1975. Тез. докл. X Всесоюз. совещ. по проблемам управления. Кн. 1. М.: ВИНТИ. 1986. С. 10–11.
3. Джафаров Э. М. Принципы построения и методы реализации комплекса многоструктурных автоматических систем и регуляторов на скользящих режимах // Тез. докл.

Х Всесоюз. совещ. по проблемам управления. М.: ВИНТИ. 1986. С. 41–42.

4. **Щавель В. В., Дорохов Е. Д., Исаков С. А., Земцов В. И.** Двухзонные следящие системы. М.: Энергоатомиздат, 1984.

5. **Ашимов А. А., Соколова Т. П.** Проектирование многомерных нелинейных систем управления с изменяющейся конфигурацией на основе метода сравнения // Тез. докл. X Всесоюз. совещ. по проблемам управления. Кн. 1. М.: ВИНТИ. 1986. С. 10–11.

6. **Стариков М. В.** Исследование автоматических систем с логическим управляющими устройствами. М.: Машиностроение, 1978.

7. **Колушев В. В., Мукасейева В. Н., Мунасыков Р. А.** К синтезу оптимальных многофункциональных систем автоматического управления. Современные проблемы автоматического управления // Тез. докл. 51 Всесоюз. совещ.-семинара молодых ученых. МВТУ. 1985. С. 71–72.

8. **Теория систем с переменной структурой** / Под ред. С. В. Емельянова. М.: Наука, 1967.

9. **Солодовников В. В., Филимонов Н. Б.** Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: Изд. МВТУ, 1987.

10. **Клячкин А. Л.** Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1969.

11. **Пономарев Б. А.** Двухконтурные турбореактивные двигатели. М.: Воениздат, 1973. 133 с.

12. **Шульгин В. А., Гайсинский С. Я.** Двухконтурные турбореактивные двигатели маломощных самолетов. М.: Машиностроение, 1984. 168 с.

13. **Шляхтенко С. М.** Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1987. 568 с.

14. **Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А.** Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991. 32 с.

15. **Августинович В. Г.** и др. Идентификация систем управления авиационных ГТД / Под общ. ред. В. Т. Дедеша. М.: Машиностроение, 1984. 196 с.

16. **Августинович В. Г., Кузнецова Т. А.** Повышение надежности систем автоматического управления газотурбин-

ными двигателями с применением алгоритмических методов // Изв. Томского политехнического университета, 2015. Т. 326, № 9. С. 68–77.

17. **Августинович В. Г., Кузнецова Т. А.** Система автоматической параметрической диагностики газозвдушного тракта авиационного двигателя на базе робастной бортовой математической модели // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14, № 9. С. 17–23.

18. **Круглов В. В., Голунов Р. Ю.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. 224 с.

19. **Власов К. П.** Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета: учеб. пособ. Харьков: Изд-во Гуманитарный центр, 2013. 544 с.

20. **Дудкин Ю. П., Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н.** Нечеткое управление частотой вращения свободной турбиной газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института (государственный технический университет). 2010. Т. 17, № 6. С. 55–60.

21. **Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.** Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. 2010. № 5. С. 17–21.

22. **Гостев В. И.** Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.

23. **Гропп Д.** Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.

24. **Леготкина Т. С., Данилова С. А.** Методы идентификации систем. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 155 с.

25. **Халов Е. А.** Одномерные многопараметрические функции принадлежности в задачах нечеткого моделирования и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 2–10.

26. **Хижняков Ю. Н.** Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейронечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.

27. **Хижняков Ю. Н.** Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.

28. **Хижняков Ю. Н.** Современные проблемы теории управления. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 237 с.

Modification of Multimode Control of an Air Jet Engine

Yu. N. Khizhnyakov, A. A. Yuzhakov, luda@at.pstu.ru,

Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Remote Control,

D. A. Sulimova, AO "ODK — STAR"

Corresponding author: Khizhnyakov Yuri N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Remote Control, Professor of the Department of Automation and Remote Control, e-mail: luda@at.pstu.ru

Accepted on May 15, 2018

Currently, multi-mode control is widely used in the management of complex controlled objects. The actual solution of this article is the replacement of the dynamic situation analyzer by the state controller by the example of controlling the air jet engine. The state of the air jet engine is characterized by the following variables: the rotary frequency of the free turbine (fan or low-pressure compressor), the rotary frequency of the high-pressure compressor, the pressure and combustion temperature of the gas in the combustion chamber, etc., which are projections of the state vector, where the operating point in the current time moves on the static characteristic. All variables depend on the fuel consumption, its quality and synchronously change at the current time. Currently, all listed parameters of the air jet engine are regulated separately, which is a disadvantage. It is proposed to replace the linear regulators of the above parameters with a single state regulator that controls the dispenser of an air jet engine. The task of the fuzzy adaptive controller state is to change the fuel consumption of the dispenser in order to control the parameters for implementing the various operating modes of the air jet engine using neural-fuzzy technology. The developed model of the state controller meets the requirements of the real-time system, and reduces the hardware costs for building the control system by eliminating the selector.

Keywords: air-jet engine, sensors, dispenser, adaptive fuzzy state controller, selector

For citation:

Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A., Sulimova D. A. Modification of Multimode Control of an Air Jet Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 595–600.

DOI: 10.17587/mau.19.595-600

References

1. **Filimonov N. B.** *Sistemy mnogorezhimnogo regulirovaniya: koncepciya, principy postroeniya, problem sinteza* (Multimode regulation systems: concept, principles of construction, synthesis problems), *The News of Higher Educational Institutions "Instrument-Making"*, 1988, vol. XXXI, no. 2, pp. 18–33 (in Russian).
2. **Zhuk K. D., Timchenko A. A., Dolenko T. I.** *Issledovanie struktur i modelirovanie logiko-dinamicheskikh sistem* (Investigation of structures and modeling of logical-dynamic systems), Kiev, Naukova Dumka, 1975, Thesis. doc. X All-Union. sovshch. on problems of management. Book 1, Moscow, VINITI, 1986, pp. 10–11 (in Russian).
3. **Dzhafarov E. M.** *Principy postroeniya i metody realizacii kompleksa mnogostrukturnykh avtomaticheskikh sistem i regulatorov na skolzyaschikh rezhimakh* (Principles of construction and methods for realizing a complex of multi-structure automatic systems and regulators on sliding regimes), *Tez. doc. X All-Union. Soveshch. on Problems of Management*, Book 1, Moscow, VINITI, 1986, pp. 41–42 (in Russian).
4. **Dorokhov E. D., Isakov S. A., Zemcov V. I.** *Dvukhzonnye sledyashchie sistemy* (Two-zonetracking systems), Moscow, Energoatom izdat, 1984 (in Russian).
5. **Ashimov A. A., Sokolova T. P.** *Proektirovanie mnogomernykh nelineynykh sistem upravleniya s izmenyayuscheysya konfiguratsiei na osnove metoda sravneniya* (Designing multidimensional nonlinear control systems with a changing configuration based on the comparison method), *Tez. doc. X All-Union. Soveshch. on Problems of Management*, Book 1, Moscow, VINITI, 1986, pp. 10–11 (in Russian).
6. **Starikova M. V.** *Issledovanie avtomaticheskikh sistem s logicheskimi upravlyayuschimi ustroystvami* (Investigation of automatic systems with logic control devices), Moscow, Mechanical Engineering, 1978 (in Russian).
7. **Kolushev V. V., Mukaseeva V. N., Munasykov R. A. K** *sintezu optimalnykh mnogofunktsionalnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (To the synthesis of optimal multifunctional automatic control systems), *Modern problems of automatic control: Tez. doc. 51 All-Union. sovsh.-seminar of young scientists*, Moscow, Publishing house of MVТУ, 1985, pp. 71–72 (in Russian).
8. **Emelyanova S. V.** ed. *Teoriya sistem s peremennoi strukturoi* (Theory of systems with variable structure), Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).
9. **Solodovnikov V. V., Filimonov N. B.** *Dinamicheskoe kachestvo sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (Dynamic quality of automatic control systems), Moscow, Publishing house of MVТУ, 1987 (in Russian).
10. **Klyachkin A. L.** *Teoriya vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* (Theory of air-jet engines), Moscow, Publishing house "Mechanical Engineering", 1969 (in Russian).
11. **Ponomarev B. A.** *Dvukhkonturnye turboreaktivnye dvigateli* (Two-circuit turbojet engines), Moscow, Military Publishing, 1973, 133 p. (in Russian).
12. **Shulgin V. A., Gaisinskii S. Ya.** *Dvukhkonturnye turboreaktivnye dvigateli malomoschnykh samoletov* (Two-circuit turbojet engines of low-powered aircraft), Moscow, Mechanical Engineering, 1984, 168 p. (in Russian).
13. **Shlyakhtenko S. M.** *Teoriya i rachet vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* (Theory and calculation of air-jet engines: a textbook for high schools), Moscow, Mechanical Engineering, 1987, 568 p. (in Russian).
14. **Sinyakov A. N., Shaimardanov F. A.** *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya LA i ikh silovymi ustanovkami* (Automatic control systems for aircraft and their power plants), Moscow, Mechanical Engineering, 1991, 32 p. (in Russian).
15. **Avgustinovich V. G., Kusnecova T. A.** *Identifikatsiya sistem upravleniya aviacionnykh GTD* (Identification of control systems for aviation GTE / Under the general), Moscow, Machine Building, 1984, 196 p. (in Russian).
16. **Avgustinovich V. G., Kusnecova T. A.** *Povyshenie nadezhnosti sistem avtomaticheskogo upravleniya gazoturbinnymi dvigatelyami c primeneniem algoritmicheskikh metodov* (Improving the reliability of automatic control systems for gas turbine engines using algorithmic methods), *Izv. Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 68–77 (in Russian).
17. **Avgustinovich V. G., Kusnecova T. A.** *Sistem avtomaticheskoi parametricheskoi diagnostiki gazovozdushnogo trakta aviacionnogo dvigatelya na baze robustnoi bortovoi matematicheskoi modeli* (The system of automatic parametric diagnostics of a gas-air tract of an aircraft engine on the basis of a robust onboard mathematical model), *Information-measuring and control systems*, 2016, vol. 14, no. 9, pp. 17–23 (in Russian).
18. **Kruglov V. V., Golunov R. Yu.** *Nechetkaya logika i iskustvennyye neironnye seti*. (Fuzzy logic and artificial neural net works), Moscow, Fizmatlit, 2001, 224 p. (in Russian).
19. **Vlasov K. P.** *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Osnovnye polozheniya. Primery racheta* (Theory of automatic control. Basic provisions. Examples of calculation. Tutorial), Publishing house of the Humanitarian Center, 2013, 544 p. (in Russian).
20. **Dudkin Yu. P., Titov Yu. K., Filippenkov R. G., Khizhnyakov Yu. N.** *Nechetkoe upravlenie chastotoi vrascheniya svobodnoi turbinoi gazoturbinnogo dvigatelya*. (Unclear control of the speed of rotation of a free turbine of a gas turbine engine), *Bulletin of the Moscow Aviation Institute (State Technical University)*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 55–60 (in Russian).
21. **Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A.** *Neiro-nechetkii regulator chastoty gazoturbinnogo dvigatelya* (Neuro-fuzzy frequency control of a gas turbine engine. Devices), 2010, no. 5, pp. 17–21 (in Russian).
22. **Gostev V. I.** *Proektirovanie nechetkikh regulatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Designing fuzzy controllers for automatic control systems), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2011, 416 p. (in Russian).
23. **Gropp D.** *Metody identifikatsii sistem* (Method of System Identification. D. Gropp), Moscow, Mir, 1979 (in Russian).
24. **Legotkina T. S., Danilova S. A.** *Metody identifikatsii sistem* (Method of system identification), Perm, Publishinghouse of Perm. state. tech. University, 2008, 155 p. (in Russian).
25. **Khalov E. A.** *Odnomernye mnogoparametricheskie funktsii prinaldlezhnosti v zadachakh nechetkogo modelirovaniya i upravleniya* (One-dimensional multiparameter membership functions in problems of fuzzy modeling and control), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2007, no. 4, pp. 2–10 (in Russian).
26. **Khizhnyakov Yu. N.** *Algoritmy nechetkogo, neironnogo i neiro-nechetkogo upravleniya v sistemakh realnogo vremeni* (Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems: Proc. Allowance), Perm, Publishing house of Perm. nat. Issled. polytechnical. University, 2013, 156 p. (in Russian).
27. **Khizhnyakov Yu. N.** *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, Neural and Hybrid Control: Textbook. Allowance), Perm, Publishinghouse of Perm. nat. Issled. polytechnical. University, 2013, 303 p. (in Russian).
28. **Khizhnyakov Yu. N.** *Sovremennyye problemy teorii upravleniya* (Modern problems of control theory), Perm, Publishing house of Perm. nat. Issled. polytechnical. University, 2015, 237 p. (in Russian).

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., devyatis@iacp.dvo.ru,
А. В. Шурыгин, мл. науч. сотр., artem.shurygin@bunjlabs.com,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Модели бортовой реконструкции параметров морского течения как навигационного фактора по данным ГЛОНАСС

Предлагается методология исследования поверхностных морских течений, рассматриваемых в качестве природных явлений, мониторинг которых актуален в контексте обеспечения безопасности и целенаправленности разнообразной деятельности человека на море. Особенность этой методологии, отличающая ее от других, состоит в том, что она отождествляет течение с переносным движением управляемого морского объекта, рассматривает его в качестве изменяющегося во времени и географическом пространстве навигационного фактора, требующего бортовой оперативной оценки текущего состояния. Представлены математические модели обратных траекторных задач вида "состояние — измерение", целью и главной составляющей решений которых является оценка вектора скорости морского течения, следующая за реконструкцией вектора абсолютной (относительно твердой Земли) скорости движения объекта по данным его позиционирования ГЛОНАСС; эти модели ассоциированы с моделью задачи оценки производных непрерывной функции времени по ее темпорально измеряемым значениям, имеющей жорданову форму матрицы с индексом нильпотентности, совпадающим с размерностью системы линейных дифференциальных уравнений состояния, что обуславливает дискретизацию задачи по времени без методологических погрешностей и реализацию вычислительных алгоритмов динамического обращения. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: навигация, морские течения, кинематические параметры, относительное движение, переносное движение, морской объект, скорость, ускорение, обратная задача, алгоритм динамического обращения, ГЛОНАСС

Введение

В течение последних десятилетий повышенное внимание мировой общественности привлекают проблемы изменчивости состояния морей и океанов в связи с заметно меняющимся климатом на Земле. Актуальны прямые угрозы со стороны водной среды тем из государств, для которых граница между сушей и морем является реальностью; усложняется хозяйственная деятельность на шельфах и водных транспортных путях морей и океанов; повышается геополитическая активность государств в связи с появлением новых противоречий между ними, обусловленных природными факторами, нарушающими сложившиеся условия функционирования и взаимодействия их экономик и т. п.

Своевременные и удовлетворительные решения всей совокупности возникающих проблем возможны только при доступности достаточно полной и качественной информации о различных природных и техногенных процессах, влияющих на состояние морей и океанов. К сложным, темпоральным и информативным проявлениям этих процессов, непосредственно характеризующим динамику водной среды, относятся морские и океанические течения.

Предлагаемое здесь исследование ориентировано на развитие методологии получения

оценок параметров, характеризующих поверхностные морские течения; по своим целям оно близко к тому, что может быть достигнуто и с помощью так называемых "дрифтерных технологий", нашедших широкое применение при изучении течений на шельфах [1]. Здесь уместно обратить внимание на то, что исследование, выполненное ранее и представленное в работе [2], в котором рассматривалось абсолютное по отношению к твердой Земле движение морского объекта, также допускает "дрифтерную" интерпретацию, когда оценивается траектория "дрифтера", т. е. дрейфующего буя с подводным парусом. Отличительная же особенность настоящего исследования состоит в том, что в нем морское течение отождествляется с переносным (как части абсолютного) движением морского объекта и рассматривается, таким образом, в качестве навигационного фактора [3], изменяющегося во времени и пространстве и требующего ответа о его свойствах "здесь и сейчас", т. е. оперативной оценки таких векторных параметров, как скорость, ускорение, рывок и т. п.

Основные модельные представления

Учитывая, что на фоне начатой в работе [2] интерпретации результатов позиционирования

ния подвижного объекта системой ГЛОНАСС/GPS в центре внимания в настоящей статье находится проблема оценки параметров морского течения, в качестве базовой координатной системы отсчета целесообразно принять эллипсоидальную систему с координатами (φ, λ, h) , комплементарную опорной модели Земли, отождествляемой с эллипсоидом Клеро с поверхностью, ортогональной направлению силы тяжести на спокойной водной поверхности Океана [4]; φ и λ — широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта, а h — расстояние объекта по нормали от поверхности эллипсоида.

В точке O , отождествляемой с подвижным морским объектом, разместим начало правого прямоугольного координатного трехгранника $O\xi = O\xi_1\xi_2\xi_3$ с плоскостью $O\xi_1\xi_2$, касательной к поверхности эллипсоида, и осями $O\xi_1$ и $O\xi_2$, ориентированными соответственно на географические Восток (E) и Север (N); ось $O\xi_3$, очевидно, ортогональна плоскости $O\xi_1\xi_2$.

Обозначим $\mathbf{V} = (V_1, V_2, V_3)^T$ вектор линейной скорости объекта относительно твердой Земли, отождествляя его с абсолютной скоростью. Вместе с этим $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ обозначим вектор угловой скорости вращения трехгранника $O\xi$, обусловленной движением объекта по поверхности эллипсоида. Оба вектора — $\mathbf{V}$ и $\boldsymbol{\omega}$ — рассматриваются в проекциях на оси $O\xi$. Тогда $\omega_1 = -\dot{\varphi}$, $\omega_2 = \dot{\lambda} \cos \varphi$, $\omega_3 = \dot{\lambda} \sin \varphi$, где $\dot{\varphi} = V_2/r_2$, $\dot{\lambda} = V_1/r_1 \cos \varphi$, r_1 и r_2 — радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных главных нормальных сечений поверхности $h = \text{const}$, проходящих через оси $O\xi_1$ (сечение, касательное к параллели) и $O\xi_2$ (меридиональное сечение), причем [4]

$$r_1 = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} + h;$$

$$r_2 = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} + h,$$

где a и e — значения большой полуоси и эксцентриситета эллипсоида. В рассматриваемом нами случае движения по водной поверхности можно принять $h = 0$ и $\dot{h} = V_3 = 0$. Таким образом, вектор $\mathbf{V}$ лежит в плоскости $O\xi_1\xi_2$, в общем случае образуя с осью $O\xi_2$ угол ψ — путевой угол движения объекта; здесь к месту заметим, что если провести нормальное сечение эллипсоида так, чтобы оно проходило через вектор $\mathbf{V}$, то радиус кривизны r_ψ этого сечения

в точке O определяется из формулы Эйлера [4] следующим образом:

$$\frac{1}{r_\psi} = \rho_\psi = \rho_1 \sin^2 \psi + \rho_2 \cos^2 \psi,$$

где $\rho_i = 1/r_i$, $i = 1, 2$ — кривизна соответствующего сечения.

Обратимся к кинематике — "геометрии движения", как определил ее суть академик А. Ю. Ишлинский [5].

Учитывая, что $V_1 = |\mathbf{V}| \sin \psi$, $V_2 = |\mathbf{V}| \cos \psi$, $V_3 = 0$ и принимая во внимание изложенное выше, получаем $\omega_1 = -|\mathbf{V}| \cos \psi / r_2$, $\omega_2 = |\mathbf{V}| \sin \psi / r_1$, $\omega_3 = (|\mathbf{V}| \sin \psi / r_1) \tan \varphi$. Углубляя теперь полученные представления о "геометрии движения" по поверхности эллипсоида, имеем $|\boldsymbol{\omega}| = \sqrt{\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega}}$, или $|\boldsymbol{\omega}| = |\mathbf{V}| q_1$, где

$$q_1 = \left(\rho_1^2 \frac{\sin^2 \psi}{\cos^2 \varphi} + \rho_2^2 \cos^2 \psi \right)^{1/2}.$$

Продолжая далее, разложим вектор $\boldsymbol{\omega}$ на два вектора, так что $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_\parallel + \boldsymbol{\omega}_\perp$, где $\boldsymbol{\omega}_\parallel$ коллинеарен, а $\boldsymbol{\omega}_\perp$ — ортогонален вектору $\mathbf{V}$; тогда

$$\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega}_\parallel^T \mathbf{V} = -|\mathbf{V}|^2 q_2; \quad |\boldsymbol{\omega}_\parallel| = \frac{|\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{V}|}{|\mathbf{V}|} = |\mathbf{V}| q_2;$$

$$|\boldsymbol{\omega}_\perp| = \sqrt{|\boldsymbol{\omega}|^2 - |\boldsymbol{\omega}_\parallel|^2} = |\mathbf{V}| q_3,$$

где $q_2 = (\rho_2 - \rho_1) \sin \psi \cos \psi$, $q_3 = (q_1^2 - q_2^2)^{1/2}$. Кроме того, имеют место следующие соотношения:

$$\omega_1^2 + \omega_2^2 = |\mathbf{V}|^2 q_4^2; \quad \omega_1^2 + \omega_3^2 = |\mathbf{V}|^2 q_5^2;$$

$$\omega_2^2 + \omega_3^2 = |\mathbf{V}|^2 q_6^2 \text{ и } \omega_1 V_2 - \omega_2 V_1 = |\mathbf{V}|^2 \rho_\psi,$$

где $q_4 = (\rho_1^2 \sin^2 \psi + \rho_2^2 \cos^2 \psi)^{1/2}$;

$q_5 = (\rho_1^2 \sin^2 \psi \tan^2 \varphi + \rho_2^2 \cos^2 \psi)^{1/2}$; $q_6 = \frac{\rho_1 \sin \psi}{\cos \varphi}$ и $q_\psi = \rho_1 \sin^2 \psi + \rho_2 \cos^2 \psi = \rho_\psi$ (уже приводимая выше формула Эйлера).

Кортеж параметров $\{q_1, \dots, q_6\}$ или $\left\{ \frac{1}{R_1}, \dots, \frac{1}{R_6} \right\}$, где R_i , $i = \overline{1, 6}$, — радиусы кривизны движения по поверхности эллипсоида, расширяют геометрический образ, связанный с моделью формы Земли и представленный при введении эллипсоидальной координатной системы и подвижного координатного трехгранника $O\xi$ (для примера — в частном случае модели шарообразной

Земли имеем $q_1 = \frac{1}{r} \left(\frac{\sin^2 \psi}{\cos^2 \varphi} + \cos^2 \psi \right)^{1/2}$, $q_2 = 0$, $q_3 = q_1$. Этот образ создается при планировании маршрутного задания и поддерживается при его выполнении, т. е. в процессе мониторинга и управления целенаправленным движением объекта.

Перейдем к математической модели решаемой здесь задачи и прежде всего отметим, что в работе [2], предшествующей настоящей, рассматривалась задача оценки параметров (местоположения, скорости, ускорения, рывка и т. д.) траектории объекта по данным его позиционирования ГЛОНАСС/GPS, т. е. задача (по содержанию и методологии решения) обратная траекторная, а по форме — "состояние — измерение" [6], где уравнения состояния описывают эволюцию кинематических элементов движения математической точки, отождествляемой с подвижным материальным объектом. По сути же, в обеих работах, и в настоящей, и в упомянутой [2], существенно обращение к классической некорректной математической проблеме численной оценки производных по времени темпорально измеряемой функции времени.

Итак, полагая, что изложенное в работе [2] решение проблемы оценки абсолютной скорости (вектора $\mathbf{V}$) состоялось, можно полагать, что бортовая навигационная аппаратура потребителя (НАП) пополнилась абсолютным лагом (АЛ). При этом существенно, что вектор $\mathbf{V}$ оценивается в проекциях на оси географически ориентированного координатного трехгранника $O\xi$. Последнее обстоятельство существенно отличает такой лаг от традиционного (например, многолучевого) АЛ, измерения которого выполняются в приборном координатном трехграннике, ориентацию которого относительно трехгранника $O\xi$ требуется еще решать дополнительно.

Согласно известным теоретико-механическим представлениям вектор $\mathbf{V} = (V_1, V_2)^T$ абсолютной скорости движения объекта по поверхности морской среды складывается из двух векторов:

$$\mathbf{V} = \mathbf{v} + \mathbf{w}, \quad (1)$$

где $\mathbf{v} = (v_1, v_2)^T$ — относительная скорость, или скорость движения относительно среды; $\mathbf{w} = (w_1, w_2)^T$ — переносная скорость, или скорость морского течения. В последнем случае, очевидно, требуется уточнить, что речь идет о поверхностном течении и надводных мор-

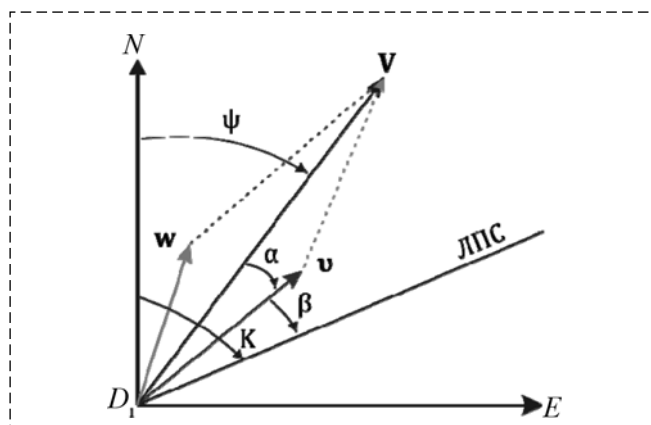


Рис. 1. Эпюра скоростей

ских объектах, которые только и способны непосредственно принимать информационные сигналы от радионавигационных систем, каковыми и являются системы ГЛОНАСС/GPS.

В плоскости $O\xi_1\xi_2$ рассмотрим эпюру скоростей с обозначенной на ней линией продольной симметрии (ЛПС) объекта и определим следующие углы (рис. 1): ψ — путевой угол; K — курсовой угол (курс); α — угол между векторами $\mathbf{V}$ и $\mathbf{v}$; β — угол между вектором $\mathbf{v}$ и ЛПС; все углы отсчитываются по ходу часовой стрелки так, что $K = \psi + \alpha + \beta$, причем K и ψ по традициям морской практики отсчитываются от направления на Север, т. е. вправо от оси $O\xi_2$; в отношении угла β необходимо сделать следующее уточнение: β — это, в общем случае, суммарный результат присутствия в измерениях курса инструментальной погрешности и действия на корпус объекта аэро- и гидродинамических сил, в том числе, например, при циркуляции объекта, а также погрешности в оценке магнитного склонения.

С учетом изложенного рассмотрим две модели (М1 и М2) измерений спутникового АЛ, имеющие единый общий вид:

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon},$$

где $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$, $z_1 = V_1 + \varepsilon$, $z_2 = V_2 + \varepsilon$; вектор $\mathbf{V} = (V_1, V_2)^T$ и вектор погрешностей измерений $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2)^T$ представлены в проекциях на оси $O\xi_1$ и $O\xi_2$ трехгранника $O\xi$, а матрица $\mathbf{H}$ и вектор $\mathbf{x}$ семантически различимы, а именно: в модели М1 — $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (v_1, v_2, w_1, w_2)^T$, $v_1 = |\mathbf{v}|\cos\alpha$, $v_2 = |\mathbf{v}|\sin\alpha$, $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$,

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin \psi & \cos \psi & 1 & 0 \\ \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

в модели М2 — $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (v_1, v_2, w_1, w_2)^T$, $v_1 = |\mathbf{v}| \cos \beta$, $v_2 = |\mathbf{v}| \sin \beta$, $\mathbf{z} = (z_1, z_2)^T$,

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & -\cos K & 1 & 0 \\ \cos K & \sin K & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Если на борту объекта имеется относительный лаг (ОЛ) и, таким образом, доступны измерения компоненты v_1 и v_2 вектора относительной скорости, то модель М2 может быть преобразована в еще одну модель — М2.2. Тогда вектор $\mathbf{z}$ (соответственно и вектор $\boldsymbol{\varepsilon}$) расширяется за счет включения в него измерений $z_3 = v_1 + \varepsilon_3$ и $z_4 = v_2 + \varepsilon_4$, где ε_3 и ε_4 — инструментальные погрешности ОЛ. Соответствующий вид принимает и матрица $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & -\cos K & 1 & 0 \\ \cos K & \sin K & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что информационный ресурс модели М2.2 существенно более значим, чем моделей М1 и М2. Несколько сокращая его, т. е. исключая измерение поперечной (v_2) компоненты относительной скорости, приходим к модели М2.1:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & -\cos K & 1 & 0 \\ \cos K & \sin K & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При актуальности предположения о малости угла β , апеллируя к моделям М2 и М2.1 как к исходным, можно в качестве оцениваемого рассматривать вектор $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T = (|\mathbf{v}|, w_1, w_2)^T$ и, таким образом, обратиться к моделям измерений М3 и М3.1 с соответствующими матрицами $\mathbf{H}$, а именно;

- в модели М3

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & 1 & 0 \\ \cos K & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

- в модели М3.1

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \sin K & 1 & 0 \\ \cos K & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

измерения z_1, z_2, z_3 в таком случае будут содержать методологические погрешности, равные соответственно — $|\mathbf{v}| \beta \cos K$, $|\mathbf{v}| \beta \sin K$, $|\mathbf{v}| \beta^2 / 2$.

Далее, рассматривая компоненту x_i вектора $\mathbf{x}$ ($i = \overline{1, m}$, где $m = 4$ для моделей М1, М2, М2.2, М2.1 и $m = 3$ для моделей М3, М3.1) как непрерывную функцию времени, в каждой точке которой существует n_i производных, последняя из которых, n_i -я, равна нулю, можем представить эволюцию состояний каждой i -й компоненты вектора $\mathbf{x}$ следующим образом: $\dot{x}_{i,j} = x_{i,j+1}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n_i}$, $x_{i,1} = x_i$, $\dot{x}_{i,n_i} = 0$, или в виде $\dot{\mathbf{X}}_i = \mathbf{J}_i \mathbf{X}_i$, где вектор состояний $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}; \dots; x_{i,n_i})^T$, а $\mathbf{J}_i$ — жорданова клетка [7] размерности $(n_i \times n_i)$, т. е.

$$\mathbf{J}_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Полагая для определенности $n_i = 5 \forall i = \overline{1, m}$, систему уравнений "состояние — измерение" запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{J} \mathbf{X}, \\ \mathbf{z} &= \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1^T, \dots, \mathbf{X}_m^T)^T$, $\dim \mathbf{X} = 5m$; $\mathbf{J} = \text{block} - \text{diag}(\mathbf{J}_1, \dots, \mathbf{J}_m)$ — жорданова матрица [7], $\dim \mathbf{J} = 5m \times 5m$; $\mathbf{J}_i = \mathbf{J}_j \forall i, j = \overline{1, m}$; $\tilde{\mathbf{H}}$ — матрица, формируемая из матриц $\mathbf{H}$, соответствующих моделям измерений М1, М2, М2.2, М2.1, М3 и М3.1 с учетом размерности вектора $\mathbf{X}$.

Учитывая нильпотентность с индексом $q = n_i = 5$ жордановой клетки $\mathbf{J}_i$, а следовательно, и матрицы $\mathbf{J}$, достаточно просто перейти к дискретной форме уравнений (2), а именно:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \tilde{\Phi}(\tau) \mathbf{X}_k; \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \tilde{\mathbf{H}}_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}, k = 0, 1, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tilde{\Phi}(\tau) = \text{block} - \text{diag}(\Phi, \dots, \Phi)$, $\Phi = \Phi_i = \Phi_j = \exp(\mathbf{J}_i \tau) = \mathbf{E} + \mathbf{J}_i \tau + \frac{\mathbf{J}_i^2 \tau^2}{2} + \frac{\mathbf{J}_i^3 \tau^3}{3!} + \frac{\mathbf{J}_i^4 \tau^4}{4!}$; $\tau = t_{k+1} - t_k = \text{const}$, $\mathbf{E}$ — единичная матрица, $\dim \mathbf{E} = \dim \Phi = 5 \times 5$, $\dim \tilde{\Phi} = 5m \times 5m$.

Существенно отметить, что дискретная система (3) при $\boldsymbol{\varepsilon} = 0$ потенциально абсолютно точно воспроизводит значения состояний и измерений, характерные для непрерывной системы (2) в момент времени t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$. Это означает, что нильпотентность матрицы $\mathbf{J}$

(в данном случае — жордановой) обуславливает возможность перехода к дискретным системам вида (3) без методологических погрешностей.

Далее имена моделей измерений присвоены обратным задачам (ОЗ) вида (2), (3), для которых эти модели являются главным отличительным образующим фактором. Заметим также, что модель ОЗ М1, ориентированная на использование только одного вида информации — спутниковой, может рассматриваться в качестве гипотетической модели автономной навигационной системы (АНС), остальные же модели — это модели гибридных (интегрированных) навигационных систем (ГНС), так как их структуры дополнительно предполагают измерения истинного курса (необходимый элемент системы) и бортовых измерений вектора относительной скорости $\mathbf{v}$.

Переходя теперь к алгоритму динамического обращения (АДО), примем его нейросетевую модель следующего вида:

$$\mathbf{Y}_{k+1} = \mathbf{C}_k \mathbf{Y}_k + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_{k+1};$$

$$\mathbf{Y}(0) = \mathbf{Y}_0,$$

где $\mathbf{Y}_k$ — оценка вектора $\mathbf{X}_k$; $\mathbf{C}_k = \Phi_k - \mathbf{K}_k \mathbf{H}$; $\mathbf{K}_k$ — матрица (вектор) синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум формируемого с учетом образа траектории и измерений квадратического критерия $\mathcal{F}$ при обращении к механизму настройки ядерного типа [8], базирующегося на калмановской модели фильтрации [9], а именно:

$$\mathbf{K}_{k+1} = \tilde{\mathbf{P}}_{k+1} \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}^T [\tilde{\mathbf{H}}_{k+1} \tilde{\mathbf{P}}_{k+1} \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}^T + \Sigma_{k+1}]^{-1};$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{k+1} = \tilde{\Phi}_k \mathbf{P}_k \tilde{\Phi}_k^T + \mathbf{Q}^*;$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{E}_{20} - \mathbf{K}_{k+1} \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}] \tilde{\mathbf{P}}_{k+1};$$

$$\mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0,$$

где $\mathbf{E}_{20}$ — единичная матрица; $(\mathbf{P}_k, \tilde{\mathbf{P}}_k)$ — матрицы, отождествляемые с дисперсионными (но, строго говоря, не являющиеся таковыми); Σ_k — положительно определенная матрица, отождествляемая с известной интенсивностью шумов измерения; $\mathbf{Q}_{k+1}^* = \arg \min_Q \mathcal{F}_{k+1}$; $\mathbf{Q}$ — положительная диагональная матрица.

Так как вектор $\mathbf{Y}_k$ с неизбежностью содержит шумовую компоненту $\sigma \mathbf{Y}_k$, для ее подавления задействована процедура вейвлет-обработки реального времени, сопутствующая работе АДО.

Вычислительные эксперименты

Прежде всего отметим, что сам принцип представления абсолютного движения как суммы двух независимых движений — относительного и переносного, формализованный уравнением (1), указывает, что при любых адекватных физической реальности моделях эволюции $\mathbf{v}$ и $\mathbf{w}$ обратная задача М1 (как модель АНС) является математически некорректно поставленной и неразрешимой ввиду неполноты спутниковой информации, что верифицируется предложенными в работе [2] процедурами и при ее численном исследовании. По сути, это означает алгоритмическую неразделимость относительного и переносного движений. Вместе с тем не отменяется и возможность получения приближенных значений $\mathbf{v}$ или $\mathbf{w}$ в случаях, когда либо $|\mathbf{v}| \gg |\mathbf{w}|$, либо $|\mathbf{w}| \gg |\mathbf{v}|$, о чем, например, свидетельствует и практика "дрифтерных технологий" [1].

Вычислительные эксперименты, выполненные с моделями М2, М2.1, М3 и М3.1, выявили, что они могут быть актуальны только в рамках гипотезы (как-то: $\beta = 0$, $\mathbf{w} = \text{const}$, $|\mathbf{v}| = \text{const}$), далеко не всегда совместимой с физической реальностью. Вместе с тем ГНС на базе модели М2.2 обладает достаточно высоким потенциалом эффективности, о чем свидетельствуют и результаты численного эксперимента (представленные на рис. 2—7), выполненного на данных измерений спутникового АЛ и бортового ОЛ со среднеквадратическими погрешностями (СКП), равными $\sigma_v = 0,03$ м [2, 10].

На рис. 2 представлена циркуляция объекта в условиях течения. Подобное движение объекта является неотъемлемой частью его ходовых испытаний, в ходе которых определяется

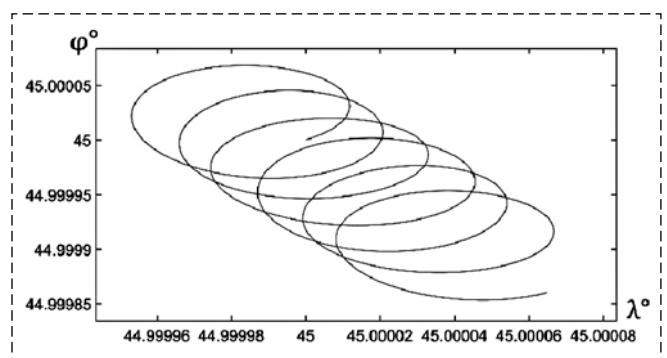


Рис. 2. Траектория движения объекта (λ° — широта, ϕ° — долгота)

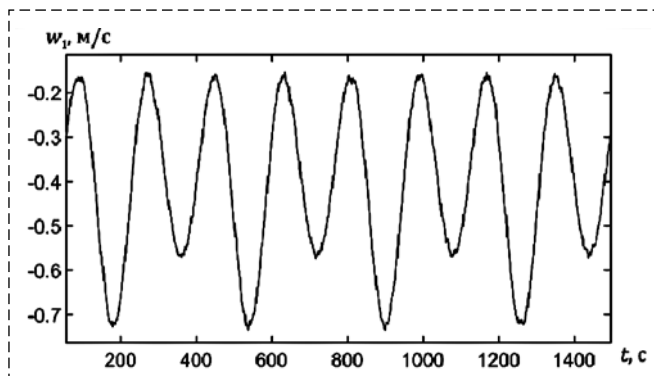


Рис. 3. АДО-оценка параметра w_1 ($\sigma_{w_1} = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с)

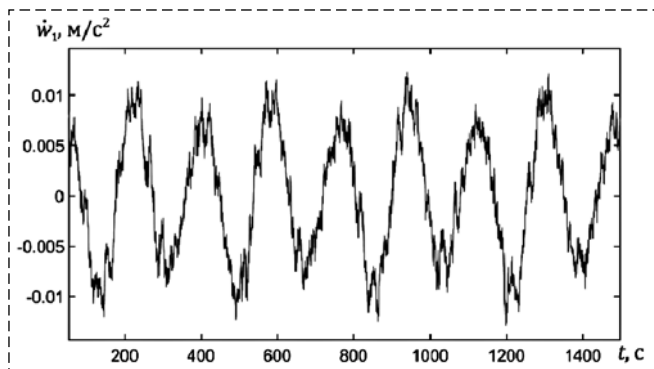


Рис. 4. АДО-оценка параметра $\dot{w}_1$ ($\sigma_{\dot{w}_1} = 2 \cdot 10^{-3}$ м/с²)

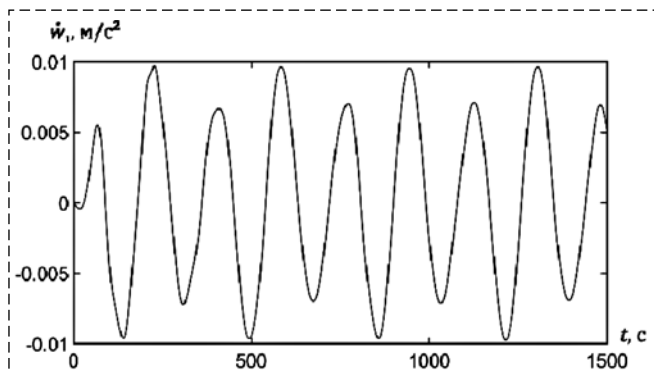


Рис. 5. Вейвлет-оценка параметра $\dot{w}_1$ ($\tilde{\sigma}_{\dot{w}_1} = 2 \cdot 10^{-5}$ м/с²)

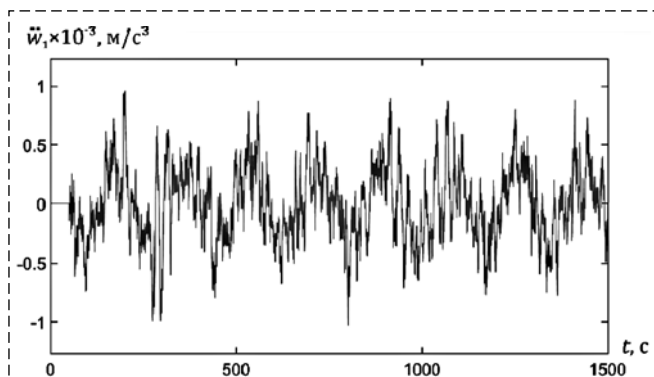


Рис. 6. АДО-оценка параметра $\ddot{w}_1$ ($\sigma_{\ddot{w}_1} = 4 \cdot 10^{-4}$ м/с³)

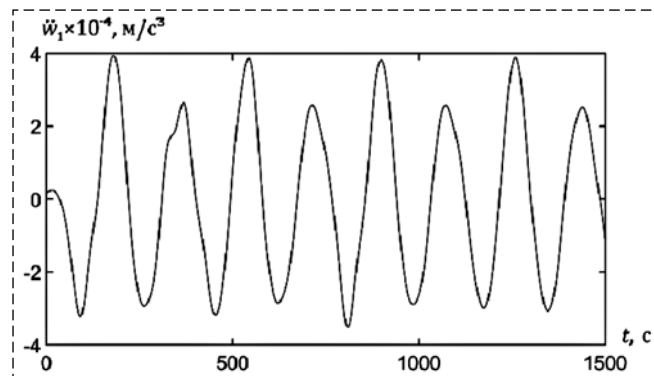


Рис. 7. Вейвлет-оценка параметра $\ddot{w}_1$ ($\tilde{\sigma}_{\ddot{w}_1} = 5 \cdot 10^{-7}$ м/с³)

важнейший параметр, зависящий от радиуса циркуляции — курсовой дрейф β , при установившейся циркуляции принимающий постоянное значение. В эксперименте положено, что $\beta = 3^\circ$. Оценка АДО выполнена с СКП $\sigma_\beta = 0,1^\circ$.

На рис. 3—7 на примере восточных компонент представлены графики оценок параметров течения ($w_1, \dot{w}_1, \ddot{w}_1$) с указанием значений СКП σ (результат оценки АДО) и $\tilde{\sigma}$ (результат онлайн вейвлет-оценки).

Заключение

В статье представлена методология аналитического и численного моделирования гибридных (интегрированных) навигационных систем, способных алгоритмически разделять с высокой точностью параметры относительного и переносного движения морского объекта при отождествлении последнего с морским течением; выполнена серия вычислительных экспериментов в целях верификации возможностей каждой из систем. Исследование ориентировано на применение в задачах высокоточного управления морскими объектами.

Список литературы

1. Мысленков С. А., Зацепин А. Г., Сильвестрова К. П., Баранов В. И. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе черного моря // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 73—80.
2. Девятисильный А. С., Шурыгин А. В., Стоценко А. К. Аналитическое конструирование и численное исследование моделей определения движения на данных ГЛОНАСС // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 11, Т. 18. С. 782—787.
3. Крюков Н. Д., Шматков В. А. Учет течений, генерируемых ветром, при плавании судов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2015. № 3 (31). С. 23—29.

4. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966. 580 с.
5. Ишлинский А. Ю. Классическая механика и силы инерции. М.: Едиториал УРСС, 2018. 320 с.
6. Калман Р., Фалб Л., Арbib М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.
7. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989. 656 с.

8. Девятисильный А. С. Модель нейросетевой инерциально-спутниковой навигационной системы с функцией оценки градиента напряженности гравитационного поля Земли // Журнал технической науки. 2016. Т. 86, № 9. С. 20–23.
9. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1972. С. 440.
10. Техническая документация. URL: <http://www.link-quest.com/html/NavQuest600M.pdf>. Дата обращения: 24.05.2018.

Models of Onboard Reconstruction of Sea Current Parameters as a Navigation Factor According to GLONASS Data

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

Corresponding author: Devyatisilny Aleksandr S., Ph. D., Professor,
Head of the Navigation and Control Department, Institute of Automation and Control Processes,
Far eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Accepted on June 08, 2018

A methodology is proposed for investigating surface sea currents that considered as natural phenomena. Monitoring of sea currents is relevant in the context of ensuring the safety and purposefulness of a variety of human activities at the sea. The peculiarity of this methodology, which distinguishes it from others, is that it identifies the current with the portable movement of a controlled marine object. It considered as a navigational factor that changes in time and geographical space and requires an on-board operational assessment of the current state. Mathematical models of inverse trajectory problems of the "state — measurement" form are presented, the aim and main component of the solutions is the velocity vector estimation of the sea current, following the reconstruction of the object absolute velocity (relatively to solid Earth) according to its GLONASS positioning data. These models are associated with the model of the estimating the derivatives problem of a continuous time function from its temporally measurable values having the Jordan form of a matrix with a nilpotency index that coincides with the dimension of the system of linear differential equations of state, which causes the discretization of the problem in time without methodological errors and the implementation of computational algorithms for dynamic circulation. The results of computational experiments are presented.

Keywords: navigation, sea currents, kinematic parameters, relative motion, portable motion, marine object, speed, acceleration, inverse problem, dynamic handling algorithm, GLONASS

For citation:

Devyatisilny A. S., Shurygin A. V. Models of Onboard Reconstruction of Sea Current Parameters as a Navigation Factor According to GLONASS Data, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 601–607.

DOI: 10.17587/mau.19.601-607

References

1. Myslenkov S. A., Zatsepin A. G., Silvestrov K. P., Baranov V. I. *Ispol'zovanie dreyfuyushchih buev i buksiruemogo profilografa dlya issledovaniya techenij na shel'fe chernogo morya* (The use of drifting buoys and a towed profiler to study currents on the Black Sea shelf), *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2014, no. 6, pp. 73–80 (in Russian).
2. Devyatisilny A. S., Shurygin A. V., Stotsenko A. K. *Analiticheskoe konstruirovaniye i chislennoye issledovanie modelej opredeleniya dvizheniya na dannyh GLONASS* (Analytical design and numerical study of models of motion determination on GLONASS data), *Mekhatronika, avtomatizatsia, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 782–787 (in Russian).
3. Kryukov N. D., Shmatkov V. A. *Uchyot techenij, generiruemym vetrom, pri plavanii sudov* (The accounting of the currents

generated by a wind, at navigation of courts), *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet them Admiral S. O. Makarov*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 23–29 (in Russian).

4. Andreev V. D. *Teoriya inercial'noj navigacii* (The theory of inertial navigation), *Autonomous Systems*, Moscow, Nauka, 1966, p. 580 (in Russian).
5. Ishlinsky A. Yu. *Klassicheskaya mekhanika i sily inercii* (Classical mechanics and inertia forces), Moscow, Editorial URSS, 2018, p. 320 (in Russian).
6. Kalman R., Falb L., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* (Essays on the mathematical theory of systems), Moscow, Mir, 1971, p. 400 (in Russian).
7. Horn R., Johnson C. *Matrichnyy analiz* (Matrix analysis), Moscow, Mir, 1989, p. 656 (in Russian).
8. Devyatisilny A. S. *Model' nejrosetevoj inercial'no-sputnikovoj navigacionnoj sistemy s funkciej ocenki gradienta napryazhenosti gravitacionnogo polya Zemli* (Model of the neural network inertial-satellite navigation system with the function of estimating the gradient of the Earth's gravitational field strength), *Zhurnal Tekhnicheskoy Nauki*, 2016, vol. 86, no. 9, pp. 20–23 (in Russian).
9. Medich J. *Statisticheskie optimal'nye linejnye ocenki i upravlenie* (Statistical optimal linear estimates and control), Moscow, EHnergia, 1972, p. 440 (in Russian).
10. **Technical specification.** <http://www.link-quest.com/html/NavQuest600M.pdf>.

V. G. Gradetsky, M. M. Knyazkov, E. A. Semenov, A. N. Sukhanov, V. G. Chashchukhin

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: gradet@ipmnet.ru, www.ipmnet.ru

Particularities of Wall Climbing Robot Motion on Underwater Environments¹

Corresponding author: **Gradetsky V. G.**, D. Sc., Professor, Chief Researcher,
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: gradet@ipmnet.ru

Accepted on June 05, 2018

The paper presents peculiarities of some components of wall climbing robots intended for motion along underwater surfaces and performs underwater technologies. Recommendations for design of vacuum contact devices equipped with "gas-water" ejector are analysed. The information data preparation for modelling and simulation the vacuum contact devices are needed to find required parameters. The obtained hydromechanical characteristics permit to prepare wall climbing robot for realization some underwater technologies.

Vacuum contact devices are intended for produce gripping functions with underwater horizontal or sloping surfaces over which underwater wall climbing robots are moving.

In motion process one platform can move when other platform is connected with surfaces by means vacuum contact devices. Another words, when external group of vacuum contact devices is fixed to the surface, internal one can move with the platform, and so on.

Underwater wall climbing robots consists of internal and external platforms equipped with vacuum contact devices placed on the end of every leg. Sensory system includes a video camera that is used for robot navigation and orientation, proximity sensors for fixation final positions of pneumatic drives and pressure-vacuum sensors intended for measure forces inside of vacuum contact devices.

Technological equipment is installed on the upper platform. Suggested experimental robot prototype has control system that permit to organize automatic or supervision control with participation of man-operator.

The drive design provides both the continuous low velocity mode to fulfill technological operations by the robot, and the discrete high velocity mode. The discrete high velocity mode is convenient for the transportation of technological equipment to working area.

This paper includes following sections: prescribed tasks for underwater wall climbing robot technologies, main peculiarities of the robot, vacuum contact devices study and conclusion.

Keywords: *underwater environment, wall climbing robot, vacuum contact devices, gas water ejector, recommendations for design*

1. Introduction

Climbing machines for underwater applications have a lot of innovations in design, construction, materials and components for mechanical, sensory, control and tool systems. In common case climbing underwater machine is a mobile underwater robot intended for realization technological prescribed tasks. The robot's mechanical system, including vacuum contact devices, drives, sensors are the mechatronic types with special design that permitted to work in underwater conditions up to 20 meters depth. Vacuum contact devices are one of the main components required special attention.

The paper presents discussion related with prescribed tasks, experimental characteristics, demands for basic schemes, recommendations for vacuum contact device design, information data for simulation and modeling.

2. Prescribed tasks for wall climbing robot technologies

Prescribed tasks for underwater climbing robots may be as follows:

- inspection and repair of the surfaces of the pools in nuclear power stations;
- technological processes producing such as cleaning, cutting, welding, along surfaces in such pools;

¹This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research Grant 18-08-00357.

- survey and cleaning of ships surfaces, during parking in ports;
- survey and cleaning of channels and dams walls;
- survey and repair of underwater parts of petroleum platforms;
- inspection and repair of underwater pipelines;
- inspection and underwater cutting of sink ships;
- help for divers.

For execution of such work it is necessary to fix the robot on the surface and then to perform the robot's movement along the surface. For these cases it is recommended to take into attention the experience of use the underwater special design climbing robots (UCR) [1]. UCR are capable to move along vertical and slope surfaces, located under water with the help of vacuum grippers [2—4]. Advantages of such robots are ability to move along the surfaces of various materials (metal, concrete, etc.) and reliable fastening on the surface.

Investigation of UCR motion under water were conducted and some results were received in [5, 6]. In this article the requirements for UCR are formulated and new opportunities of their application are considered.

In spite of obtained previous results, new problems are developed, such as nuclear power station service that required additional investigation to design more reliable vacuum contact devices [7].

3. Main of UCR's peculiarities

Besides general features for all type underwater vehicles (such as increased pressure, fluidity environment, etc.), a surface quality is important of a UCR reliable motion. As a rule, the surfaces, located under water are covered by different kinds of sea-weeds and deposits. Therefore for motion along such surfaces it is necessary special vacuum contact devices or combined with mechanical grippers. Application of jet gauges is possible for control vacuum grippers. Also, it is possible to clean a surface of motion. One of important quantity is that, the influence of water currents on UCR motion is less then on floating underwater vehicles.

Certainly, the main type of underwater vehicles (UV) are various floating apparatuses, however UCR has its own place in general hierarchy and it is difficult to find substitution for them.

The designed UCR consists of two platforms (Fig. 1). Here 1 is internal platform with leg group 3

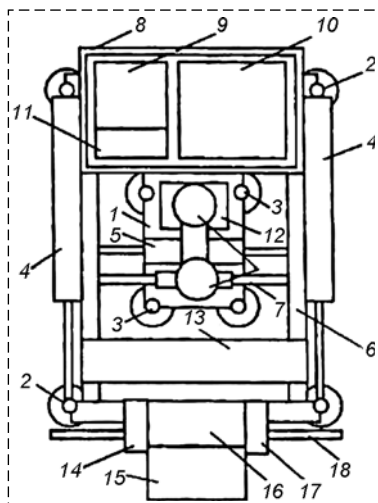
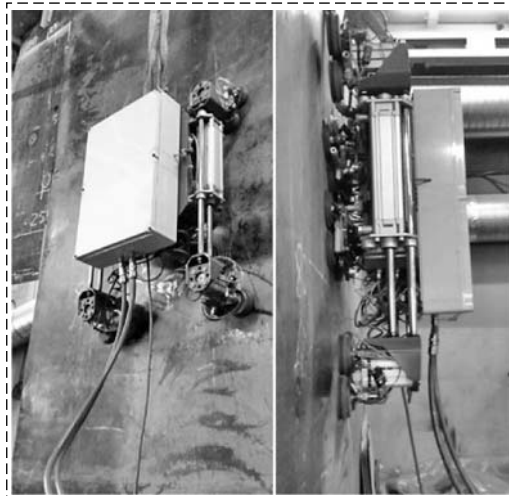


Fig. 1. Scheme of Underwater Climbing Robot



and vacuum contact devices (VCD) on every leg; 2 — leg group with VCD of external platform; 4 — transport pneumatic drive; 5 — rotating unit; 6 — external platform; 7 — piston-drive; 8 — technological platform; 9 — technological equipment; 10—11 — germatic units of control system; 12—15 — platforms for sensory equipment.

A technological module is installed on the platform. A video camera is used for navigation and orientation of the robot. A control unit organizes automatic control of the whole system.

The URC moves as follows. When the internal group of the VCD is connected to motion surface by means of the grippers, the external one has possibility to move easily with a piston-rod relative to the platform or the platform can rotate to change the direction of motion by rotation unit. When the external group of the VCD is fixed on the surface, the internal one can move with the platform, and so on.

The view of one prototype version is shown in Fig. 2. The following forces are acting on UCR in underwater position (Fig. 3):

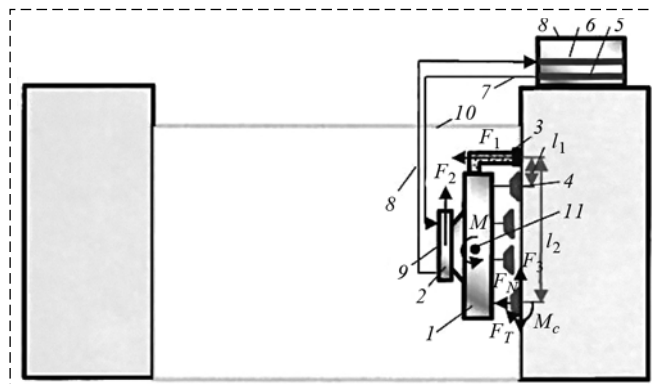


Fig. 3. Underwater robot place and acting forces on Underwater Climbing Robot

F_1 — technological force, F_2 — acting force of water column, F_3 , F_N and F_T — friction, normal and tangential forces, acting on every vacuum contact device, M_c — moment acting on every vacuum contact device, M_1 — overturn moment applied at center of mass of UCR.

Acting vibrations on UCR as result of technological processes may be harmonic type, $F_1 = A \sin \omega t$.

Motion equation of the pneumatic drive piston of UCR with technological equipment mass m may be written as follows:

$$\Sigma F_i = 0 \text{ or } \ddot{x} = \frac{1}{m} (F_0 + F_1 + F_2 + F_3 - F_4),$$

where F_1 — technological force, F_2 — acting force of water column, F_3 — dry friction force, $F_4 = D \dot{x}$ — viscous friction in pneumodrive, $D = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ H} \cdot (\text{c/M})$ — coefficient of viscous friction; F_0 — additional payload of UCR, $P_0 = m_0 g \cdot \sin \alpha$, m_0 — total UCR mass, g — acceleration due to gravity, α — angle of surface.

Reduction gear sets the desired value of the output drive velocity. The microprocessor connected with regulator and rack carries out a control of the PC working longitudinal motion.

This drive design provides both the continuous low speed mode to fulfil technological operations by the robot, and the discrete high speed mode. The discrete high speed mode is convenient for the fast transportation of the technological equipment by the UCR to working zone. The discrete high speed mode is switched on by a control muff disconnection. In the continuous low speed mode a control muff connects the engine block with PC. In this case, the drive output velocity depends on the engine velocity.

4. Vacuum contact devices study

Vacuum contact device (VCD) is intended for realize gripping function of UCR with a surface in underwater position. The standard friction gripper (FG) have a normal gripping force of over 1000 N, but they need an initial press force about 150 N to seal the possible roughness and cracks of a motion surface. There are standard sealing grippers (SG), which can seal the roughness up to 4 mm and more by an elastic edge, but they have no sufficient gripping force. The combination of these two kinds of grippers gives a possibility of having a high gripping force with a sealing effect on the rough surfaces.

This two-staged VCD is shown in Fig. 4, where 1 — elastic sealing, 2 — pad is realize function of force sealing and is connected with piston drive 5, 4 — ejector, 6 — position sensor, P_{S1} , P_{S2} — supply

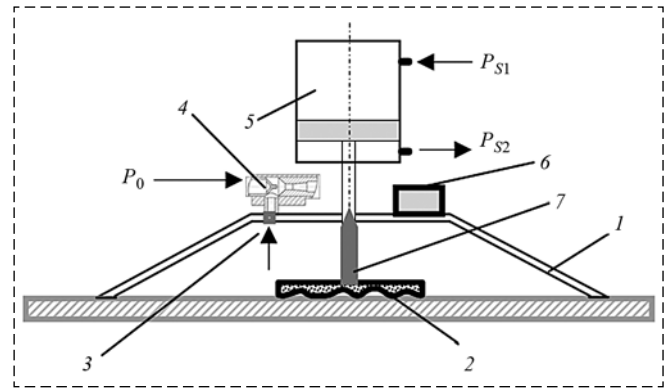


Fig. 4. Scheme of vacuum contact device with a piston drive

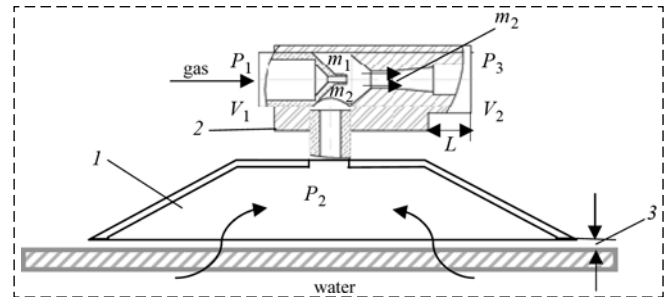


Fig. 5. Scheme of vacuum contact device with ejector

pressure for piston drive. At the initial moment only the SGs are actuated. They produce an attaching force enough to seal the roughness for the FGs. This is the first "sealing" stage. After the sealing response time is finished in about 1,7 sec the power ejector is switched on. As result the FGs carry out a force fixation of the UCR by means VCD on the motion surface in about 2 sec response time. Time is the second "force" stage of the gripping. The used FGs with diameter 160 mm provide an attaching force up to 1100 N. The two-staged gripping takes approximately 4 sec and then it is possible to begin a working stage to fulfil a stride by moving one group of the VCD relative to another one, which is fixed to a motion surface.

The gas ejector 4 (Fig. 4) of VCD is intended for produce vacuum P_2 in the chamber 3. Air and water mass flow through the every of channels 1, 2, 3 of the ejector 4 (Fig. 4, 5) can calculated as

$$m_i = \rho_i V_i S_i,$$

where ρ_i — density, V_i — velocity, S_i — space of cross section of i -flow. For gas stream $S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$, for water stream $S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$, for mixture flow $S_3 = \frac{\pi D^2}{4}$.

The following balance equations are valid for gas-water ejector [6, 7]:

motion balance:

$$m_1 V_1 + P_1 S_1 + m_2 V_2 + P_2 S_2 = (m_1 + m_2) V_3 + P_3 S_3; \quad (1)$$

energy balance:

$$m_1 \frac{V_1^2}{2} + m_2 \frac{V_2^2}{2} = (m_1 + m_2) \frac{V_3^2}{2}. \quad (2)$$

Using those equation, it is possible to find vacuum P_2 , if other parameters are known [7]:

$$P_2 = \left[\frac{1}{S_2} m_1 V_1 + P_1 S_1 + m_2 V_2 - P_3 S_3 - (m_1 + m_2) \left(\frac{m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2}{m_1 + m_2} \right)^{1/2} - \frac{1}{2D} (\lambda P_3 (L - L_T) \Phi^2) \frac{m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2}{m_1 + m_2} \right], \quad (3)$$

where P_1, P_2, P_3 — pressure in the cross section 1, 2, 3, coefficient $\lambda = \frac{0,3164}{(Re)^{1/4}}$, Re — Reynolds number, Φ^2 — Martinelly parameter [9].

We supposed that pressure P_2 is in chamber 1 (Fig. 5), x — variable pneumatic restriction where pressure change from atmospheric P_a up to vacuum P_2 , 3 — constant pneumatic restriction, and $P_a - P_2 = k \cdot P$ — linear approximation.

The force characteristics depends on the depth are presented in Fig. 6.

The number of the VCD for such a purpose is calculated beforehand depending on a total weight

of the UCR with technological equipment. A diameter of one VCD is got from the next formula:

$$d = \sqrt{\frac{4F_n}{\pi \Delta \rho}},$$

where F_n — normal detaching force, $\Delta \rho$ — pressure difference between VCD vacuum volume and environment.

The normal detaching force is calculated as

$$F_n \geq \frac{F_t}{\mu} + F_e,$$

where F_t — tangential detaching force; F_e — normal detaching force from technological equipment; μ — friction coefficient.

Conclusion

Main particularities of technological wall climbing robot motion on underwater conditions are under consideration. Recommendations for vacuum contact devices design permit to choose needed force parameters of underwater climbing robots. It is supposed that every robots is equipped with "gas-water" ejector that generate necessary vacuum for satisfy reliable force contact robot with surface in underwater conditions.

The experimental characteristics of vacuum contact devices are illustrate the possibilities of robot motion in underwater environments.

References

1. **Gradetsky V. G., Rachkov M. Y.** Wall Climbing Robots, Moscow, The Institute for Problems in Mechanics RAS, 1997, pp. 223.
2. **Tariq P. Sattar, Paul Hilton, MDDMAR Faruq Howlader,** Deployment of Laser Cutting Head with Wall Climbing Robot for Nuclear Decommissioning. Proceed of CLAWAR 2016 Inter. Conference, Advance in Cooperative Robotics, London, UK, Sept. 2016, pp. 725–732.
3. **Zhao Z., Shirkoohi G.** Climbing Robot Design for NDT Inspection. Proceed of CLAWAR 2017 Inter. Conference, Human — Centric Robotics, Porto, Portugal, Sept. 2017, pp. 259–266.
4. **Gradetsky V., Veshnikov V., Kalinichenko S.** 1995, Multi-links Walking Robot. Proc. 7th International Conf. on Advanced Robotics, ICAR'95. Sant Feliu de Guixols, September 1995, Vol. 1, pp. 401–405.
5. **Robotics in Nuclear Facilities,** 1991, Special issue for Exhibition of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 11), Tokyo, August 1991, pp. 25–28.
6. **Gradetsky V., Knyazkov M., Sukhanov A., Semenov E., Chashchukhin V., Kryukova A.** 2017, Possibility of Using Wall Climbing Robots for Underwater Application. Proceed. of CLAWAR-2017 Intern. Conference, Human-Centric Robotics, Porto, Portugal, Sept. 2017, pp. 239–246.
7. **Kozlov D., Pavlov A., Yashchuk V.** The Mathematical Model of the Gas-Liquid Ejector with the Straight Mixing Chamber. Izvestia of Volgograd State Technical University, pp. 8–11.

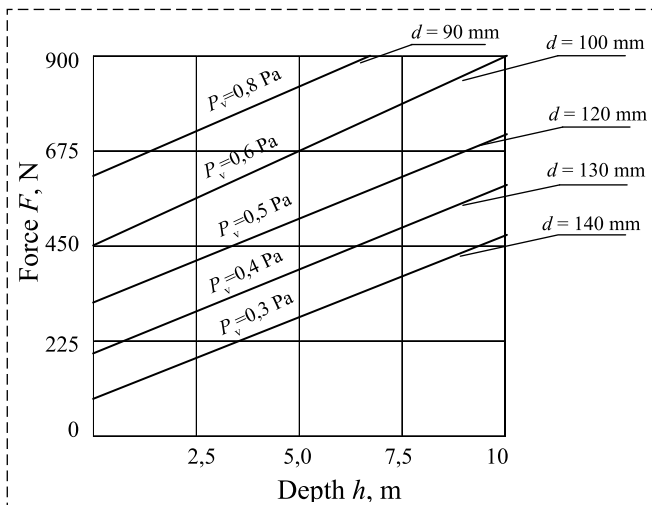


Fig. 6. Acting forces of vacuum control devices depend of water depth

М. В. Бобырь, д-р техн. наук, проф., fregat_mn@rambler.ru,
А. А. Дородных, аспирант, А. С. Якушев, аспирант,
Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Устройство и программная модель управления пневматическим мехатронным комплексом¹

Рассматривается пневматический мехатронный комплекс (ПМК), управление которым осуществляется с помощью интерактивной сенсорной панели человеком-оператором. Представлена пневмоэлектрическая схема соединения компонентов мехатронного комплекса. Пневматический мехатронный комплекс состоит из электрических, электронных, пневматических, пневмоэлектрических компонентов и программного обеспечения. Построена функциональная карта технологического процесса фиксации парящего объекта, перемещения и складирования в лоток хранения, которая включает 13 шагов. Для управления ПМК используется программируемый логический контроллер (ПЛК) Siemens S7-1200 и сенсорная панель Siemens HMI KTP 400 Basic. Взаимосвязь компонентов ПМК осуществляется за счет построения промышленной сети связи. Реализуется промышленная сеть с помощью интерфейса Ethernet. Ethernet-коммутатор Siemens Scalance XB05 объединяет в общую сеть ПЛК, сенсорную панель и персональный компьютер. Для каждого устройства задается IP-адрес и маска подсети. Для реализации этапов технологического процесса разработан экспериментальный вид экрана оператора. На сенсорной панели отображаются кнопки для того, чтобы человек-оператор мог управлять ПМК в ручном режиме. Программное управление ПМК реализовано в среде Tiaportal v.14 с использованием языка программирования LAD (Ladder Diagram). В статье показаны и описаны части программного кода, которые реализуют: движение вверх/вниз по бесштоковому цилиндру каретки со схватом; втягивание и выдвигание цилиндра со схватом; открытие и закрытие схвата; подачу и отключение воздуха в сопло; выдвигание цилиндра подачи объектов в зону действия струи воздуха. Проведен эксперимент с выявлением времени выполнения операций технологического процесса фиксации парящего объекта, перемещения и складирования его в лоток хранения. Фиксация времени выполнения происходила отдельно для каждого этапа и для полного цикла от стартового положения до возврата объекта в лоток хранения. Сумма времени выполнения отдельных операций составила примерно 17 с. Полный цикл человек-оператор может выполнить за 22 с.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер (ПЛК), интерактивная сенсорная панель, пневматический мехатронный комплекс (ПМК), фиксация парящего объекта, функциональная карта

Введение

Автоматизированные и автоматические промышленные линии широко внедряются в промышленность и применяются для выполнения различных технологических процессов (ТП): фасовки [1], сборки [2], сортировки [3]. Для реализации и управления данными ТП используются промышленные ПЛК. Их задачей является сбор информации о ходе ТП с помощью различных датчиков и выдача управляющих сигналов на исполнительные механизмы, которые могут быть электрическими, пневматическими, гидравлическими, механическими. Для связи между собой всех компонентов используется промышленная сеть с различными интерфейсами связи. В общем виде устройства подключаются к коммутатору посредством интерфейса Ethernet.

В промышленных конвейерах одна из основных задач — это обнаружение и перемещение объекта, например, в зону складирования. Данные операции могут выполняться автоматически или человеком-оператором в ручном режиме.

В данной работе рассматривается управление ПМК для фиксации парящего в воздухе объекта и перемещения его в лоток хранения объектов.

Структура пневматического мехатронного комплекса

ПМК с интерактивной сенсорной панелью предназначен для обнаружения, удержания и перемещения объекта. В структуру ПМК входят: пневматические, пневмоэлектрические, электрические и электронные компоненты и программное обеспечение.

К пневматическим компонентам относятся: малошумный компрессор, фильтр-регулятор с манометром на входе комплекса, бесштоковый цилиндр (БЦ), два штоковых цилиндра (ШЦ), сопло с дросселем регулировки струи воздуха, пневматический схват, фитинги для подключения шлангов, два манометра и фильтр-регулятор на компрессоре.

Пневмоэлектрические компоненты комплекса состоят из пневмоострова (набора электропневматических распределителей, объединенных в общем корпусе).

Электрические компоненты включают: блок питания постоянного напряжения 24 В, соединительные провода, клеммную колодку.

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта Президента РФ МД-707.2017.8 и Госзадания: Соглашение № 2.3440.2017/4.6.

Электронные компоненты: ПЛК *Siemens S7-1200*, *Ethernet*-коммутатор *Siemens Scalance XB05*, интерактивная сенсорная панель *Siemens HMI KTP 400 Basic*, персональный компьютер [4, 5].

Программное обеспечение включает среду разработки *Tia portal v.14* и язык программирования *LAD*.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлен внешний вид ПМК для фиксации парящего в воздухе объекта.

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) представлена пневмоэлектрическая схема соединения компонентов ПМК.

Управление процессами ПМК осуществляется промышленным ПЛК фирмы *Siemens* из семейства *S7-1200*, оснащенный центральным процессорным устройством (ЦПУ) модели 1214C [6—8].

Сетевая настройка устройств для подключения мехатронного комплекса

Для программирования, управления и взаимосвязи ПЛК, сенсорной панели и ПК все элементы ПМК объединяются в промышленную сеть. К *Ethernet*-коммутатору *Siemens Scalance XB05* подключены: ПК, ПЛК *Siemens S7-1200*, панель оператора *KTP-400 Basic*. Виртуальную коммуникацию устройств осуществляют в программной среде *TIA Portal V14*. Для установления сетевой связи между ПЛК и интерактивной сенсорной панелью используется раздел редактора и настройки сетей "*Devices & network*" (рис. 3).

При конфигурации промышленной сети необходимо назначить *IP*-адреса всем устройствам (см. таблицу).

Функциональная карта процесса управления в режиме оператора

Технологический процесс фиксации парящего в воздухе объекта представлен на рис. 4 в виде функциональной карты [9]. В функциональной карте в блоке действий сначала прописывается исполнительный механизм (см. рис. 1, 2), к которому обращается оператор, а затем указывается действие, которое необходимо выполнить с этим механизмом.

Необходимо учитывать, что функциональная карта ТП ПМК (рис. 4) носит экспериментальный характер. Для достижения поставленной цели может использоваться последовательность действий, отличная от представленных на рис. 4, так как оператор может изменить порядок промежуточных операций, но при этом

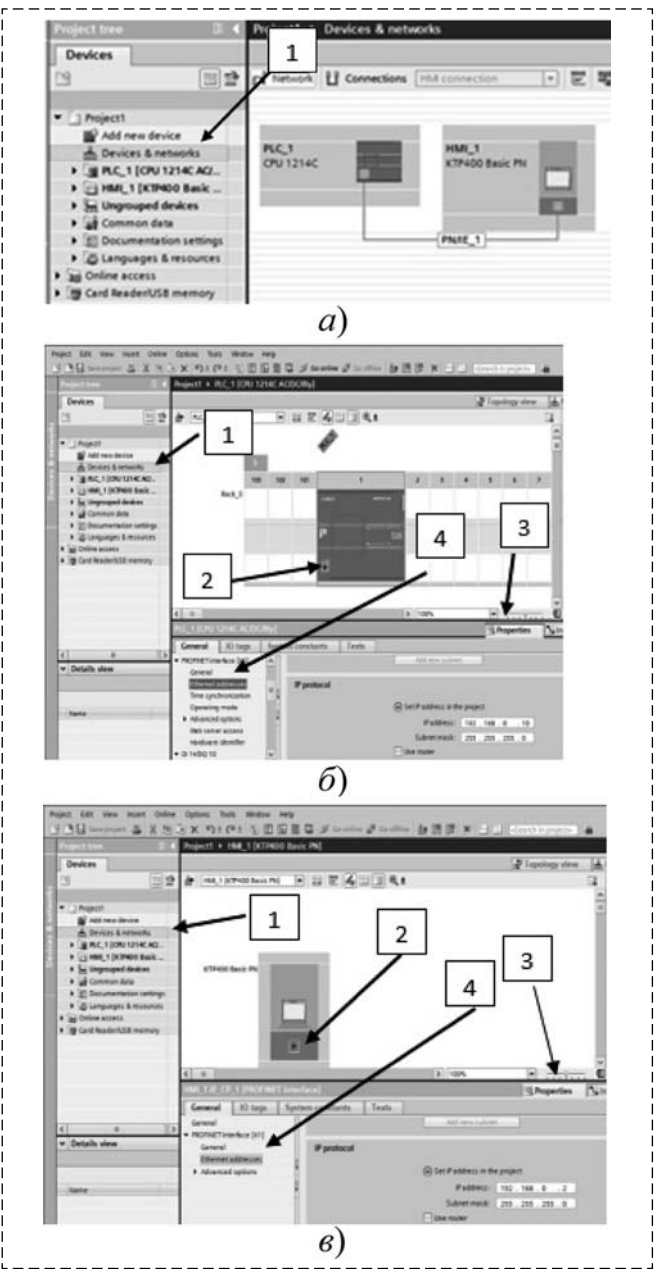


Рис. 3. Конфигурирование промышленной сети: а — установление связей между ПЛК и сенсорной панелью; б — конфигурирование ПЛК; в — конфигурирование сенсорной панели; 1 — рабочая область "Devices & networks"; 2 — графическое обозначение Ethernet-соединения; 3 — закладка "Свойства"; 4 — область назначения IP-адреса

Параметры промышленной Ethernet-сети

	ПЛК	Сенсорная панель	ПК
IP-адрес	192.168.0.10	IP:192.168.0.2	192.168.0.1
Маска подсети	255.255.255.0	255.255.255.0	255.255.255.0

достигнуть конечного и правильного результата, например, включить подачу воздуха в сопло и не отключать ее до конца выполнения всех операций.

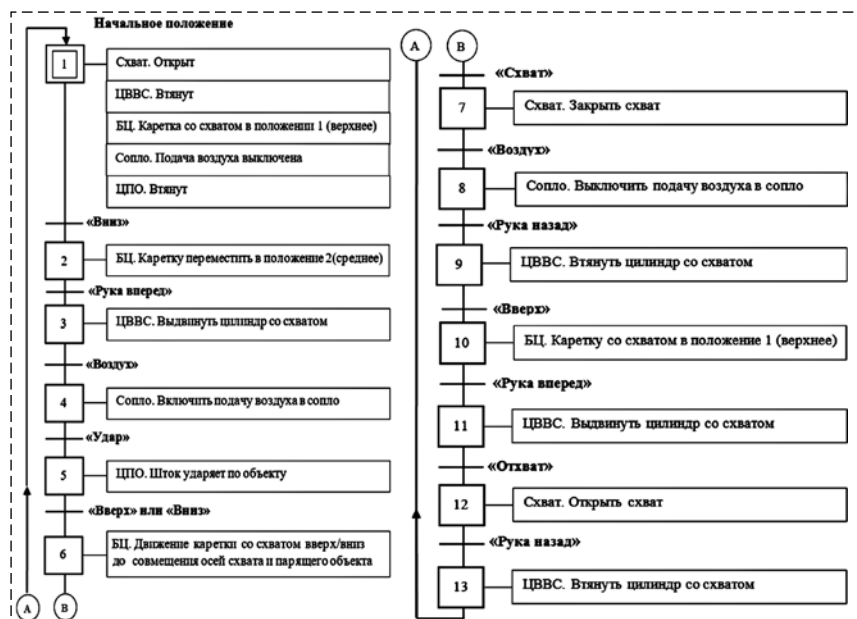


Рис. 4. Функциональная карта технологического процесса фиксации парящего объекта

Программный код для управления пневматическим мехатронным комплексом в режиме оператора

Программирование ПЛК [10] и панели оператора происходит в среде *Tia Portal V14*. Управление ПМК в режиме оператора осуществляется с помощью интерактивной сенсорной панели, на которой располагаются кнопки для управления элементами системы. На рис. 5 представлен экспериментальный вид экрана оператора с минимальным набором кнопок, который может меняться в зависимости от выполняемых задач.

Кнопки на экране оператора имеют названия, совпадающие с командами-действиями функциональной карты (см. рис. 4).

На рис. 5 располагаются виртуальные кнопки: "вверх/вниз" — для перемещения каретки со схватом вверх/вниз по БЦ; "рука вперед/

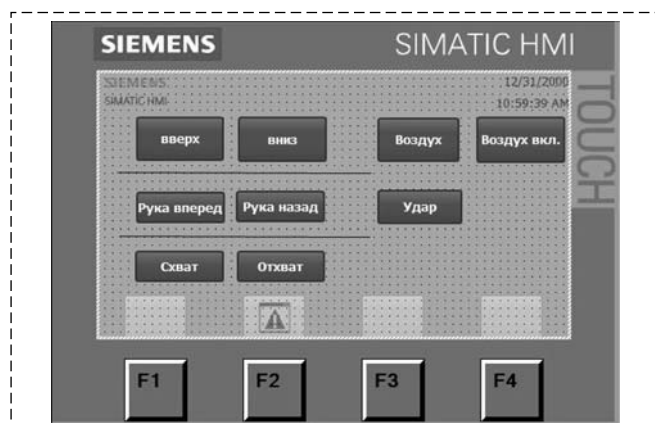


Рис. 5. Экспериментальный экран рабочего окна оператора

рука назад" — для выдвижения и втягивания штока цилиндра выдвижения и втягивания схвата (ЦВВС); "схват/отхват" — кнопки закрытия и открытия схвата (фиксация и отпускание объекта); "воздух вкл./воздух" — включение и отключение подачи воздуха в сопло; "удар" — шток ЦПО ударяет по объекту и перемещает его зону действия струи воздуха.

При создании программной модели управления ПМК авто-рами написаны маркеры-идентификаторы (рис. 6) или логические переменные процесса, содержащие имя, тип данных и адрес для получения доступа к информации в ячейке памяти.

После создания таблицы переменных для ПЛК и интерактивной сенсорной панели необходимо ре-

ализовать программный код управления ПМК в режиме оператора, в котором применяются три основных вида переменных: *I* — входы ПЛК, *Q* — выходы ПЛК; *M* — виртуальные переменные.

ТП фиксации парящего объекта включает 12 шагов без выставления начального положения ПМК.

Шаг 1. Движение каретки вниз по БЦ.

Каретка со схватом, закрепленная на БЦ из положения 1 (верхнего) должна переместиться в положение 2 (среднее). Для этого на сенсорной панели нужно нажать кнопку "Вниз" [12].

При нажатии на сенсорной панели кнопки "Вниз", которой присвоена виртуальная переменная ($\%M0.1$ "arm_down") происходит замыкание нормально-разомкнутого контакта (НРК) на реальный цифровой выход ПЛК $\%Q0.5$, и передается логическая "1", представленная в виде 24В, на катушку БЦ для движения вниз. Как только каретка достигает положения 2 (среднего), на БЦ оператор отпускает кнопку на сенсорной панели и прекращается подача напряжения на катушку БЦ.

Шаг 2. Выдвижение ЦВВС.

После движения каретки до положения 2 (среднего) происходит выдвижение схвата по нажатию на сенсорной панели кнопки "Рука вперед".

Для выдвижения схвата оператор нажимает кнопку "Рука вперед", тем самым замыкая НРК и подавая логическую "1" на выход ПЛК $\%Q0.0$, приводя в действие катушку ЦВВС.

Шаг 3. Подача воздуха в сопло.

На шаге 3 включается воздух, подаваемый в сопло через дроссель. Дроссель необходим

а)

Name	Data type	Address	Retain	Access	Write	Visible	Comment
1 arm	Bool	%Q0.0					катушка цилиндра выдвижения и втягивания схвата
2 arm_inside	Bool	%Q0.2					Захват стянут
3 arm_outside	Bool	%Q0.2					Захват выдвинут
4 up	Bool	%Q0.4					движение каретки бесштокового цилиндра вверх
5 down	Bool	%Q0.5					движение каретки бесштокового цилиндра вниз
6 arm_up	Bool	%M0.0					кнопка "вверх"
7 arm_down	Bool	%M0.1					кнопка "вниз"
8 shvat	Bool	%Q0.1					Катушка открытия и закрытия схвата
9 shvat_virt	Bool	%M0.2					кнопка "схват"
10 othvat_virt	Bool	%M0.3					Кнопка "отхват"
11 vpered_ruka	Bool	%M0.5					Выдвижение цилиндра со схватом
12 nazad_ruka	Bool	%M0.6					Втягивание цилиндра со схватом
13 udar_shank	Bool	%Q0.2					Катушка цилиндра поднимает объектов в струю воздуха
14 udar	Bool	%M0.7					Кнопка "удар"
15 vozduz_katushka	Bool	%Q0.3					Катушка подачи и отключения воздуха в сопло
16 vozduz	Bool	%M1.1					Кнопка "воздух вкл"
17 vozduz_vykl	Bool	%M1.2					Кнопка "воздух"

б)

Name	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	Addr...	Access	Acquisit...	Source comment
DOWN1	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	arm_down		<symbo...	1 s	кнопка "вниз"
nazad_ruka	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	nazad_ruka		<symbo...	1 s	Втягивание цилиндра со схватом
othvat_virt	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	othvat_virt		<symbo...	1 s	Кнопка "отхват"
shvat_virt	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	shvat_virt		<symbo...	1 s	кнопка "схват"
udar	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	udar		<symbo...	1 s	Кнопка "удар"
UP1	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	arm_up		<symbo...	1 s	кнопка "вверх"
vozduz	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	vozduz		<symbo...	1 s	Кнопка "воздух вкл"
vozduz_vykl	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	vozduz_vykl		<symbo...	1 s	Кнопка "воздух"
vpered_ruka	Bool	HMI_Conne...	PLC_1	vpered_ruka		<symbo...	1 s	Выдвижение цилиндра со схватом
<Add new>								

Рис. 6. Логические переменные (tags):

а — переменные для ПЛК; б — переменные для сенсорной панели

для регулирования высоты подъема объекта в воздухе.

%Q0.2 — адрес реального выхода ПЛК, к которому подключена катушка ЦПО.

Шаг 5. Позиционирование схвата относительно парящего объекта.

На шагах 1—4 реализован приблизительный подвод каретки со схватом к объекту, объект подан в струю воздуха и парит. Далее необходимо более точно провести позиционирование [13, 14]. Для этого необходимо добавить к команде движения каретки "Вниз" команду движения "Вверх".

%Q0.4 — адрес реального выхода ПЛК, к которому подключена катушка для движения каретки вверх на БЦ. Выходы ПЛК %Q0.4 и %Q0.5, к которым подключены катушки БЦ, управляют движением каретки вверх и вниз.

Шаг 6. Фиксация объекта.

После того как схват сориентирован относительно парящего объекта, его необходимо поймать схватом [15—17]. Для этого в программе реализуется операция закрытия схвата с удержанием объекта.

Шаг 7. Выключение подачи воздуха в сопло.

Когда объект пойман схватом, отключается подача воздуха в сопло. Это операция, обрат-

ная включению подачи воздуха. Для ее выполнения необходимо в программе поменять тип катушки с "Set" на "Reset" и на сенсорной панели нажать кнопку "Воздух".

Шаг 8. Втягивание цилиндра со схватом и удержание объекта схватом.

Для того чтобы при подъеме каретки со схватом не происходили удары о лоток хранения и желоб, нужно втянуть цилиндр, на котором закреплен схват. Этот процесс, обратный процессу, описанному на шаге 2.

Шаг 9. Движение вверх.

Выполнив шаг 8, нужно переместить вверх схват, удерживающий объект. Функция движения каретки вверх реализована на шаге 5.

Шаг 10. Выдвижение ЦВБС.

Шаг 10 идентичен шагу 2. Отличие состоит в том, что на шаге 10 схват удерживает объект, а на шаге 2 схват открыт.

Шаг 11. Открытие схвата и возвращение объекта в лоток хранения.

После выдвижения цилиндра со схватом вперед последним шагом является открытие схвата и возврат объекта в лоток хранения. Для этого оператор нажимает кнопку "Отхват", и происходит раскрытие схвата.

После открытия схвата объект падает в желоб и далее скатывается в лоток хранения.

Шаг 12. Втягивание ЦВВС.

Вернув объект в лоток хранения, человек-оператор нажимает кнопку "Рука назад", и ЦВВС втягивается, после чего цикл считается законченным.

Эксперимент

Эксперимент строится на проверке работоспособности программного кода и правильности подключения компонентов ПМК. В процессе эксперимента оператор выполняет последовательно этапы технологического процесса фиксации парящего объекта с последующим возвратом объекта в лоток хранения согласно функциональной карте [15, 16].

При проведении эксперимента было выполнено 11 операций и зафиксировано время выполнения каждой операции по отдельности:

1) движение вниз каретки из точки старта (каретка на БЦ находится в положении 1 и перемещается в положение 2); время выполнения операции 3,76 с;

2) выдвижение схвата; время выполнения операции 0,59 с;

3) включение струи воздуха; время выполнения операции 0,42 с;

4) подача объекта в поток воздуха из сопла; время выполнения операции 1,12 с;

5) позиционирование схвата; время выполнения операции 3,43 с;

6) схват и удержание объекта; время выполнения операции 0,63 с;

7) выключение подачи воздуха в сопло; время выполнения операции 0,35 с;

8) втягивание схвата; время выполнения операции 0,83 с;

9) движение каретки по БЦ в положение 1; время выполнения операции 4,60 с;

10) выдвижение схвата с удержанием объекта схватом; время выполнения операции 0,41 с;

11) открытие схвата и опускание объекта в лоток хранения; время выполнения операции 0,90 с.

Суммарное время выполнения отдельных операций 17,04 с. Время выполнения цикла составляет примерно 22 с.

Заключение

В данной статье рассмотрен ПМК для фиксации парящего объекта и его перемещения, а также его структура и компоненты. Технологи-

ческие операции выполняются согласно построенной функциональной карте. Представлен и описан программный код управления данным комплексом

Список литературы

1. **Каляев И. А., Каяев А. И., Коровин Я. С.** Принципы организации и функционирования безлюдного роботизированного производства с децентрализованным диспетчером // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 741—749.
2. **Бабаян П. В., Гаврилов А. Н.** Использование систем технического зрения при автоматизации производства герконов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 6. С. 15—19.
3. **Лошицкий П. А., Шеховцова Е. Е.** Расчет и моделирование работы промышленного манипулятора на силовых оболочковых элементах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 7. С. 470—475.
4. **Patel J., Patel A., Singh R.** Development of PLC based process loop control for bottle washer machine // Procedia Technology. 2014. N. 14. P. 365—371.
5. **Aydin G., Ozan A., Hilmi K.** Remote Remote access for education and control of mechatronics systems // Procedia-Social and Behavioral sciences. 2015. N. 176. P. 1050—1055.
6. **Программируемые контроллеры S7-1200** [электронный ресурс] / Системы автоматизации и автоматика // Internet-https://www.saa.su/Document/PLC/Simatic/cpu_S7-1200_2013.pdf.
7. **Hacksteiner M., Duer F., Ayatollahi I., Bleicher F.** Automatic assessment of machine tool energy efficiency and productivity // Procedia CIRP. 2017. N. 62. P. 317—322.
8. **Альтерман И. З.** Программируемые контроллеры Simatic S7: 2-й уровень профессиональной подготовки: Учебник (раздаточный материал): Промышленная автоматизация, 2011. 66 с.
9. **Олсон Г., Пиани Д.** Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский диалект, 2001. 557 с.
10. **Бергер Г.** Автоматизация с помощью программ Step7 LAD и FBD // Программируемые контроллеры Simatic S7-300/S7-400. Siemens, 2001. 605 с.
11. **Программируемый контроллер S7-1200 системное руководство** // Siemens, Германия, 2009. 398 с.
12. **Альтерман И. З.** Программирование панелей оператора Simatic // Учебный центр "Симатик", 2014. 78 с.
13. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С.** Автоматическая система охлаждения режущего инструмента в задаче управления оборудованием с ЧПУ. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 7. С. 558—563.
14. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Якушев А. С.** Нечеткая иерархическая система угловой ориентации мобильного робота. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 7. С. 458—464.
15. **Bobyry M. V., Milostnaya N. A., Kulabuhov S. A.** A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // Applied Soft Computing Journal. 2017.59, pp. 19—32. DOI: 10.1016/j.asoc.2017.05.040.
16. **Bobyry M. V., Milostnaya N. A.** Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic inference, Вестник компьютерных и информационных технологий, 133 (2015) 7—15. doi: 10.14489/VKIT.2015.07. PP. 007—015.
17. **Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Милостная Н. А.** Обучение нейронечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15—26.

Device and Program Model of Pneumatic Mechatronic Complex Control

M. V. Bobyr, fregat_mn@rambler.ru, A. A. Dorodnykh, alex.dorodnych@mail.ru, ,
A. S. Yakushev, alekseyakushev@yandex.ru,
South-West State University, 305040, Kursk, Russian Federation

Corresponding author: **Bobyr Maksim V.**, D.Sc., Prof.,
South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation,
fregat_mn@rambler.ru

Accepted on June 05, 2018

The article deals with the pneumatic mechatronic complex (PMC), which is controlled by an interactive touch panel by a human operator. A pneumo-electric circuit for connecting components of the mechatronic complex is presented. The pneumatic mechatronic complex consists of electrical, electronic, pneumatic, pneumo-electric components and software. A functional map of the technological process of fixing a floating object, moving and storing in a storage tray, which includes 13 steps, is constructed. To control the PMC, a programmable logic controller (PLC) Siemens S7-1200 and a touch panel Siemens HMI KTP 400 Basic are used. The interconnection of PMK components is carried out through the construction of an industrial communication network. The industrial network is implemented using the Ethernet interface. The Ethernet switch Siemens Scalance XB05 combines a PLC, a touch panel and a personal computer into a common network. For each device, you specify the IP address and subnet mask. To implement the stages of the technological process, an experimental view of the operator's screen was developed. On the touch panel, buttons are displayed so that the human operator can control the PMC in manual mode. Program control PMC is implemented in the Tiaportal v.14 environment using the LAD programming language (Ladder Diagram). The article shows and describes parts of the code that implement: moving up / down the rodless cylinder of the carriage with the grip; retraction and extension of the cylinder with grasping; opening and closing of the grasp; supply and deactivation of air in the nozzle; extension of the cylinder supplying objects to the zone of action of the air stream. An experiment was conducted to reveal the time for performing operations of the technological process of fixing the floating object, moving and storing it in the storage tray. The commit of the execution time occurred separately for each stage and for the complete cycle from the start position to the return of the object to the storage tray. The amount of time for performing individual operations was approximately 17 seconds. The complete cycle man-operator can perform in 22 seconds.

Keywords: programmable logic controller (PLC), interactive sensor-based panel, pneumatic mechatronic complex (PMC), fixation of a floating object, functional map

Acknowledgements: This article was executed with support of grant of President RF MD-707.2017.8 and state assignment: Agreement № 2.3440.2017/4.6.

For citation:

Bobyr M. V., Dorodnykh A. A., Yakushev A. S. Device and Program Model of Pneumatic Mechatronic Complex Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 612–617.

DOI: 10.17587/mau.19.612-617

References

1. Kalyaev I. A., Kayaev A. I., Korovin Ya. S. *Principy organizatsii i funktsionirovaniya bezlyudnogo robotizirovannogo proizvodstva s decentralizovannym dispetcherom*, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 11, pp. 741–749 (in Russian).
2. Babayan P. V., Gavrilov A. N. *Ispol'zovanie sistem tekhnicheskogo zreniya pri avtomatizatsii proizvodstva gerkonov*, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 6, pp. 15–19 (in Russian).
3. Loshickij P. A., Shekhovcova E. E. *Raschet i modelirovanie raboty pro-myshlennogo manipulyatora na silovykh obolochkovykh ehlementah*, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, no. 7, pp. 470–475 (in Russian).
4. Patel J., Patel A., Singh R. Development of PLC based process loop control for bottle washer machine, *Procedia Technology*, 2014, no. 14, pp. 365–371.
5. Aydin G., Ozan A., Hilmi K. Remote Remote access for education and control of mechatronics systems, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, no. 176, pp. 1050–1055.
6. *Programmiruemye kontroli S7-1200, Sistemy Avtomatizatsii i Avtomatika*, available at: https://www.saa.su/Document/PLC/Simatic/cpu_S7-1200_2013.pdf.
7. Hacksteiner M., Duer F., Ayatollahi I., Bleicher F. Automatic assessment of machine tool energy efficiency and productivity, *Procedia CIRP*, 2017, no. 62, pp. 317–322.
8. Al'terman I. Z. *Programmiruemye kontroliery Simatic S7-2-j uroven' professional'noj podgotovki*, *Promyshlennaya avtomatizatsiya*, 2011, 66 p. (in Russian).
9. Olson G., Piani D. *Cifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya*, SPb., Nevskij dialekt, 2001, 557 p. (in Russian).
10. Berger G. *Avtomatizatsiya s pomoshch'yu programm Step7 LAD i FBD*, *Programmiruemye kontroliery Simatic S7-300/S7-400*, Siemens, 2001, 605 p. (in Russian).
11. *Programmiruemyj kontroller S7-1200 sistemnoe rukovodstvo*, Siemens, Germaniya, 2009, 398 p.
12. Al'terman I. Z. *Programmirovaniye panelej operatora Simatic*, Uchebnyj centr "Simatik", 2014, 78 p. (in Russian).
13. Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S. *Avtonomnaya sistema ohla-zhdeniya rezhushchego instrumenta v zadache upravleniya oborudovaniem s CHPU*, *CHast' I, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 558–563 (in Russian).
14. Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S. *Nechetkaya ierarhicheskaya sistema uglovoj orientatsii mobil'nogo robota*, *CHast' I, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 458–464 (in Russian).
15. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Kulabuhov S. A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio, *Applied Soft Computing Journal*, 2017, vol. 59, pp. 19–32, DOI: 10.1016/j.asoc.2017.05.040 (in Russian).
16. Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic inference, *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii*, 133 (2015), pp. 7–15, doi: 10.14489/VKIT.2015.07.PP.007-015.
17. Bobyr M. V., Kulabuhov S. A., Milostnaya N. A. Obucheniye nejro-nechetkoj sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadej, *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2016, no. 4, pp. 15–26 (in Russian).

Т. С. Буканова, канд. техн. наук, доц., BukanovaTS@volgatech.net,

М. Т. Алиев, канд. техн. наук, доц., AlievMT@volgatech.net,

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Экспериментальное исследование электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением

Статья посвящена развитию теоретических представлений элементов и систем управления. Практическая реализация современных систем автоматического управления на базе единых модулей требует использования альтернативных конструкций функционирования механических узлов, в частности в двухроторном исполнении. Это позволит реализовать адаптивное поведение машины в технологическом процессе, перемещение рабочих органов по сложным контурам с различной скоростью, высокой надежностью и безопасностью. Совокупность математического и экспериментального исследования является одним из перспективных и наиболее распространенных методов изучения объектов исследования, позволяет изучить его функционирование, научиться эффективно управлять объектом.

Целью работы является экспериментальное исследование электропривода двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением путем натурного эксперимента и получение его переходных характеристик.

Для проведения натурного эксперимента разработана и изготовлена экспериментальная установка электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением, которая содержит механическую нагрузку, управляемую электрическую нагрузку, блок управления электрической нагрузкой, терминальную компьютерную управляющую систему. Экспериментальное исследование электропривода заключалось в регистрации частот вращения роторов двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением в различных режимах работы при изменении входных нагрузок: механической и электрической. В ходе проведения эксперимента получены данные, отражающие переходные процессы электропривода по частотам вращения роторов, а также суммарную частоту вращения роторов. Проведена статистическая обработка данных полученных результатов и последующий сравнительный анализ результатов полученных ранее имитационных экспериментов и натурных данных установившихся значений частот вращения роторов в различных режимах работы электропривода.

Анализ представленных данных моделирования показывает качественное и количественное (в пределах 10 %) соответствие имитационного эксперимента натурному. Это означает, что разработанная математическая модель двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением адекватна, отражает реальные физические процессы, протекающие в разработанной электрической машине и позволяет исследовать параметры и получить характеристики электропривода на ее основе в различных режимах работы.

Ключевые слова: дифференциальное управление, электропривод, двухроторная электрическая машина, экспериментальное исследование

Введение

В настоящее время сложные технологические процессы во многих отраслях промышленности сопровождаются интенсивной эксплуатацией механических узлов. Тенденцией развития современного машиностроения является внедрение в технологический процесс производства мехатронных технологических машин и роботов.

Основным направлением технического перевооружения промышленности является внедрение современных систем автоматического управления на базе единых модулей, объединяющих собственно электромеханические компоненты, которые управляются микроконтроллерами, персональными компьютерами или другими вычислительными средствами [1, 2]. Практическая реализация указанных взаимосвязей требует использования альтернативных

конструкций функционирования механических узлов, в частности, в двухроторном исполнении, применение которых в технологическом процессе позволит реализовать адаптивное поведение машины, перемещение рабочих органов по сложным контурам с различной скоростью, высокой надежностью и безопасностью.

Для оценки свойств электропривода необходимо получить его основные характеристики. Совокупность математического и экспериментального исследования является одним из перспективных и наиболее распространенных методов изучения объектов исследования, позволяет изучить его функционирование, научиться эффективно управлять объектом путем апробирования различных вариантов управления, прогнозирования состояния объекта под действием внешних дестабилизирующих факторов [3–6].

Целью работы является экспериментальное исследование электропривода двухроторной

электрической машины с дифференциальным управлением путем натурного эксперимента и получение его переходных характеристик.

**Электропривод на основе
двухроторной электрической машины
с дифференциальным управлением**

Для проведения натурного эксперимента разработана и изготовлена экспериментальная установка электропривода (ЭП) [7] на основе двухроторной электрической машины (ДЭМ) с дифференциальным управлением (ДУ), которая используется для систем кондиционирования и вентиляции воздуха [8], функциональная схема которой представлена на рис. 1. Механической нагрузкой ДЭМ с ДУ предла-

гаемого ЭП является крыльчатка с постоянным наклоном лопастей, поэтому управление объемом (скоростью) перекачиваемого воздуха осуществляется изменением частоты вращения внутреннего ротора.

ДЭМ с ДУ соединена с сетью переменного напряжения общепромышленного назначения. В результате роторы ДЭМ начинают вращаться. Внутренний ротор ДЭМ с ДУ соединен с механической нагрузкой ЭП и предназначен для приведения в действие рабочего органа технологической машины с заданной частотой вращения, что, в свою очередь, приводит к вращению промежуточного ротора.

Промежуточный ротор ДЭМ с ДУ соединен с блоком управления нагрузкой через управляемый выпрямитель напряжения, формирующий шину постоянного тока. Блок управле-

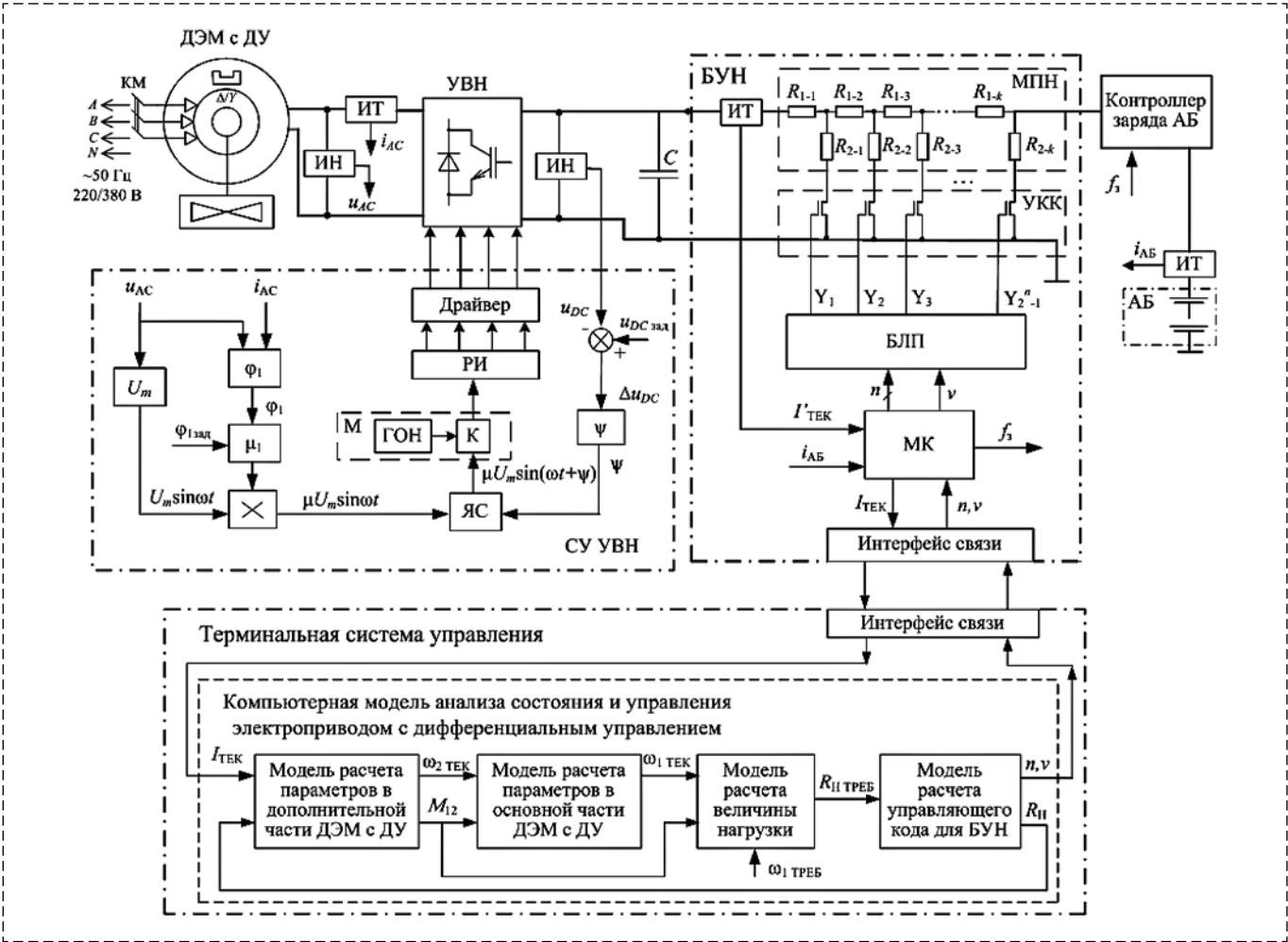


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением: КМ — контактор; УВН — управляемый выпрямитель напряжения; СУ УВН — система управления управляемым выпрямителем напряжения; ИН — измеритель напряжения; ИТ — измеритель тока; МПН — матрица полезной нагрузки; УКК — управляемые коммутируемые ключи; БЛП — блок логического преобразования; БУН — блок управления нагрузкой; МК — микроконтроллер; АБ — аккумуляторная батарея; РИ — распределитель импульсов; К — компаратор; ГОН — генератор опорного напряжения; ЯС — ячейка сдвига; М — модулятор

ния нагрузкой содержит управляемую коммутируемую матрицу полезной нагрузки, которая включена в цепь обмотки дополнительной части. Управление нагрузкой происходит по сигналу n , определяющему число дополнительно подключаемых в качестве нагрузки элементов матрицы полезной нагрузки — сопротивление R_n . Матрица полезной нагрузки представляет собой электрическую цепь из повторяющихся элементарных нагрузок с двумя номиналами R_{1-k} и R_{2-k} . Каждый отвод нагрузки R_{2-k} соединен с общей шиной через управляемые коммутируемые ключи. Исходя из структуры блок управления нагрузкой реализует дискретное изменение сопротивления R_n в зависимости от управляющего сигнала с блока логического преобразования [1].

Терминальная система управления представляет собой компьютерную управляющую систему, которая на основе силы тока I , протекающего по нагрузке и обмотке дополнительной части, восстанавливает текущие параметры ДЭМ с ДУ. На основе анализа восстановленных параметров, в частности частоты вращения внутреннего ротора, и заданной требуемой частоты вращения происходит расчет требуемой нагрузки $R_{n, \text{треб}}$ в обмотке дополнительной части и формирование сигнала управления n . Процесс управления ЭП на основе ДЭМ с ДУ заключается в подстройке частоты вращения внутреннего ротора ЭП и сводится к управлению значением нагрузки R_n дополнительной части ДЭМ с ДУ [8].

Экспериментальное исследование электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением

При проведении эксперимента определяют следующие показатели, отображаемые на дисплее и регистрируемые на ЭВМ:

- частота вращения внутреннего ротора ДЭМ с ДУ, мин^{-1} ;
- частота вращения промежуточного ротора ДЭМ с ДУ, мин^{-1} ;
- суммарная частота вращения роторов, мин^{-1} .

В ходе проведения эксперимента были сняты основные параметры при следующих режимах работы:

- режим I предусматривает подачу прямоугольного сигнала на вход механической

нагрузки и отсутствие сигнала на входе дополнительной части. Данный режим предназначен для проверки работоспособности и правильности работы основной части ДЭМ с ДУ и получения номинальной частоты вращения устройства, используемой для последующей оценки правильности функционирования. Данный режим представляет собой разгон внутреннего ротора ДЭМ с ДУ с нагрузкой при жестко закреплённом промежуточном роторе, что соответствует режиму включения и работе основной двигательной части — *режим включения двигателя*;

- режим II определяется подачей сигнала электромагнитного момента вращения, выработанного основной частью, на промежуточный ротор. Данный режим предназначен для оценки правильности функционирования устройства, которая определяется распределением частот вращения между роторами ДЭМ с ДУ при действии на них сигнала выработанного электромагнитного момента. Данный режим представляет собой растормаживание промежуточного ротора устройства при работе основной части под нагрузкой — *режим расторможенных роторов*;
- режим III характеризуется подачей на вход электрической нагрузки сигнала прямоугольного импульса при работе устройства в режиме II. Данный режим предназначен для оценки влияния электрической нагрузки на частоту вращения внутреннего ротора и управляемости устройства. Для получения характеристик переходного процесса подключается минимально возможная электрическая нагрузка, обеспечивающая максимальный момент со стороны обмотки дополнительной части, препятствующий вращению промежуточного ротора;
- режим IV предусматривает изменение амплитуды сигнала на входе механической нагрузки при работе устройства в режиме II. Данный режим соответствует процессу изменения механической нагрузки на внутреннем роторе ДЭМ с ДУ в процессе функционирования.

Результаты эксперимента, представленные результатами измерений непрерывной величины, подвергались статистической обработке в соответствии с ГОСТ Р 50779.22—2005, который определяет расчет точечной оценки и доверительного интервала для среднего.

Для получения переходных процессов в ЭП на основе ДЭМ с ДУ используется ступенчатое изменение входного воздействия для двух внешних нагрузок: электрический и механический [9, 10].

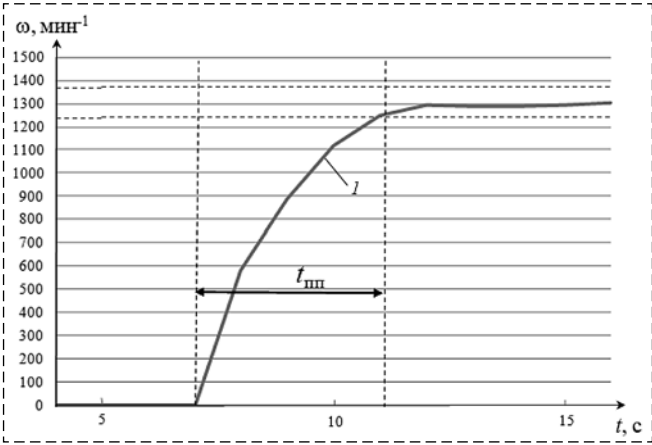


Рис. 2. Переходной процесс электропривода на основе двух-роторной электрической машины с дифференциальным управлением в режиме I для внутреннего ротора (I)

Таблица 1

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	1304	[1301,58; 1306,42]
Частота вращения промежуточного ротора	0	—

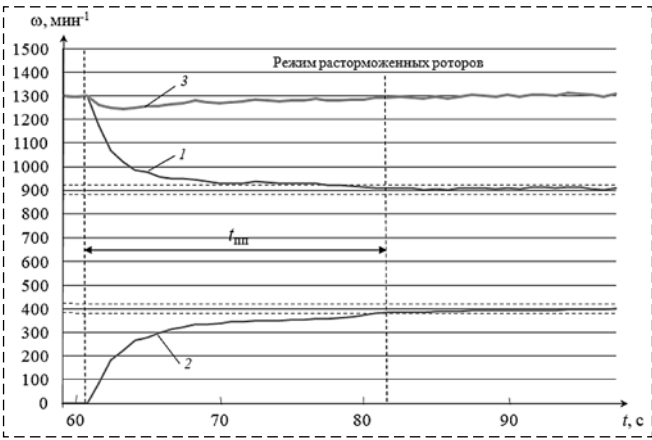


Рис. 3. Переходные процессы электропривода на основе электрической машины с дифференциальным управлением в режиме расторможенных роторов для внутреннего (1), промежуточного (2) роторов и суммарная частота вращения роторов (3)

Таблица 2

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	902	[900,18; 903,82]
Частота вращения промежуточного ротора	401	[399,04; 402,96]

Переходной процесс ($t_{пп}$) ЭП в режиме I представлен на рис. 2. Режим включения двигателя предусматривает разгон внутреннего ротора при жестко закрепленном промежуточном роторе, моделирующий разгон и работу обычного асинхронного двигателя, включенного в сеть.

Результаты статистической обработки данных оценки частоты вращения внутреннего ротора установившегося режима включения ЭП при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$ представлены в табл. 1.

Фрагмент экспериментальных данных, отражающий переходные процессы ЭП от момента растормаживания промежуточного ротора в режиме I до установившегося значения частот вращения роторов, а также суммарную частоту вращения роторов, представлен на рис. 3.

Время переходного процесса в режиме II расторможенных роторов $t_{пп} = 21,1$ с. Значительное увеличение времени переходного процесса для данного режима связано с разгоном промежуточного ротора ДЭМ с ДУ, обладающего значительным моментом инерции. Статистическое представление данных установившегося процесса режима расторможенных роторов по частотам вращения при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$ представлены в табл. 2.

Фрагмент экспериментальных данных, отражающий переходные процессы ЭП от момента подключения минимально возможной электрической нагрузки к дополнительной части в режиме расторможенных роторов до установившегося значения частот вращения роторов во времени, а также суммарную частоту вращения роторов, представлен на рис. 4.

Время переходного процесса для установления частот вращения при включении минимальной нагрузки составляет $t_{пп} = 6,7$ с. Статистическое представление данных установившегося процесса режима расторможенных роторов при включения минимальной электрической нагрузки с доверительной вероятностью $1 - \alpha = 0,95$ представлены в табл. 3.

Следующим объектом исследования является переход из режима расторможенных роторов ЭП на основе ДЭМ с ДУ при резком подключении дополнительной механической нагрузки, т. е. ситуация, когда после установления частот вращения в режиме расторможенных роторов на внутренний ротор резко увеличивается механическая нагрузка. Фрагмент экспериментальных данных, отражающий переходные процес-

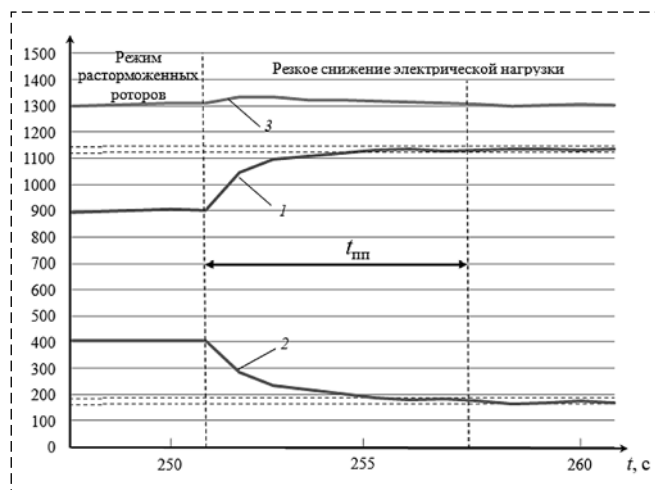


Рис. 4. Переходные процессы электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением в режиме расторможенных роторов при включении минимальной электрической нагрузки для внутреннего (1), промежуточного (2) роторов и суммарная частота вращения роторов (3)

Таблица 3

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	1135	[1132,92; 1137,08]
Частота вращения промежуточного ротора	173	[172,19; 173,81]

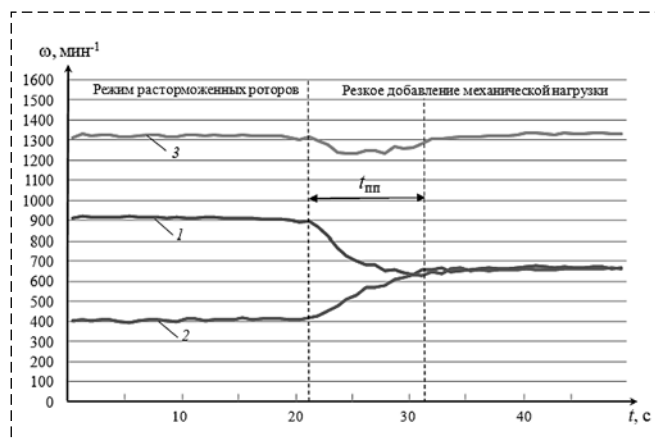


Рис. 5. Переходные процессы электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением в режиме расторможенных роторов при резком добавлении механической нагрузки для внутреннего (1), промежуточного (2) роторов и суммарная частота вращения роторов (3)

Таблица 4

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	665	[660,97; 669,03]
Частота вращения промежуточного ротора	663	[599,66; 666,34]

сы по частотам вращения, а также суммарную частоту вращения, представлен на рис. 5.

Время переходного процесса при условии резкого добавления механической нагрузки составляет соответственно $t_{пп} = 11,1$ с. Статистическое представление данных для установившихся процессов по частотам вращения при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$ представлено в табл. 4.

Для оценки адекватности математической модели было проведено сравнение данных натурного эксперимента с результатами имитационного моделирования по установившимся значениям частот вращения роторов ДЭМ с ДУ в представленных режимах работы [9]. По результатам сравнения отклонение модельных данных от экспериментальных в режиме включения двигателя составляет 3,3 % для внутреннего ротора; в режиме расторможенных роторов 7,7 % и 5,9 % для внутреннего и промежуточного роторов соответственно; при резком подключении минимально возможной нагрузки в режиме расторможенных роторов — 2,6 % и 8,1 %; при резком добавлении механической нагрузки в режиме расторможенных роторов — 6,6 % и 7,5 %. Кроме того, установившееся значение суммарной частоты вращения роторов не изменяется для всех режимов работы ЭП и соответствует номинальной частоте вращения двигательного устройства.

Заключение

Представленные результаты экспериментальных исследований позволили проверить соответствие имитационного эксперимента натурному и оценить адекватность разработанной математической модели. Проверка соответствия проводилась сравнением рассчитанных по модели и определенных в ходе эксперимента параметров экспериментальной установки для системы кондиционирования и вентиляции воздуха на основе ДЭМ с ДУ в различных режимах и условиях функционирования. Проведен расчет отклонений полученных значений натурного и имитационного эксперимента.

Анализ представленных данных имитационного и натурного моделирования показывает качественное и количественное (в пределах 10 %) соответствие имитационного эксперимента натурному. Значит, предложенная математическая модель ЭП на основе ДЭМ с ДУ

адекватна, отражает реальные физические процессы, протекающие в разработанной ДЭМ с ДУ, позволяет исследовать параметры и получать характеристики ДЭМ с ДУ в различных режимах работы. Разработанная схема ЭП на основе ДЭМ с ДУ работоспособна, позволяет функционировать в нескольких режимах.

Разработанная экспериментальная установка ЭП на основе ДЭМ с ДУ позволила провести исследование функционирования при управлении в диапазоне 0,87...0,7 номинальной частоты вращения

Список литературы

1. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2005.
2. Nasar S. A. Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics (Schaum's Outline series). McGraw-Hill. 2007.

3. Макаров В. Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 109—120.
4. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2002.
5. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wiley-IEEE Press. 2002.
6. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Prentice Hall. 2001.
7. Патент 2400006 Российская Федерация, МПК7 Н 02К 16/02 Электрическая машина / Савиных А. Б., Буканова Т. С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет. № 2009104680/28; заявл. 11.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. 8 с.
8. Буканова Т. С., Алиев М. Т. Микропроцессорная система электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 2. С. 106—110.
9. Буканова Т. С. Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. С. 21—27.
10. Буканова Т. С., Савиных А. Б., Алиев М. Т. Алгоритм управления электропривода с дифференциальным торможением // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. Тула: Изд-во ТулГУ. 2012. С. 120—129.

Pilot Study of the Electric Drive on the Basis of the Two-Rotor Electrical Machine with Differential Management

T. S. Bukanova, BukanovaTS@volgatech.net, M. T. Aliev, AlievMT@volgatech.net,
Volga State University of Technology Yoshkar-Ola

Corresponding author: **Bukanova Tatjana S.**, Ph. D., Associate Professor,
Volga State University of Technology Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation,
e-mail: BukanovaTS@volgatech.net

Accepted on May 13, 2018

Article is devoted to development of theoretical representations of elements and control systems. Implementation of the modern systems of automatic control on the basis of uniform modules demands use of the alternate designs of functioning of mechanical clusters, in particular in two-rotor execution. It will allow to realize adaptive behavior of the car in technological process, movement of actions on the composite contours with various speed, high reliability and safety. The set of mathematical and pilot study is one of perspective and most widespread methods of studying of objects of a research, allows to study its functioning, to learn to operate efficiently an object. The purpose of work is the pilot study of the electric drive of the two-rotor electrical machine with differential management by a natural experiment and receiving its surge characteristics. For carrying out a natural experiment the pilot unit of the electric drive on the basis of the two-rotor electrical machine with differential management which contains mechanical loading, the operated electric loading, the control unit of electric loading, the terminal computer operating system is developed and made. The pilot study of the electric drive consisted in filing of rotation frequencies of rotors of the two-rotor electrical machine with differential management in various duties at change of entrance loadings: mechanical and electric. During an experiment the data reflecting transition phenomena of the electric drive on rotation frequencies of rotors and also a cooperative rotation frequency of rotors are obtained. Statistical data processing of the received results and the subsequent comparative analysis of results of the received earlier imitating experiments and the natural these established values of rotation frequencies of rotors in various duties of the electric drive is carried out. The analysis of the submitted data of model operation shows qualitative and the quantitative (within 10 %) compliance of an imitating experiment to natural. Means, the developed mathematical model of the two-rotor electrical machine with differential management is adequate, reflects the actual physical processes proceeding in the developed electrical machine and allows to investigate parameters and to receive characteristics of the electric drive on its basis in various duties.

Keywords: differential management, electric drive, two-rotor electrical machine, pilot study

For citation:

Bukanova T. S., Aliev M. T. Pilot Study of the Electric Drive On The Basis Of The Two-Rotor Electrical Machine with Differential Management, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 618—624.

DOI: 10.17587/mau.19.618-624

References

1. Kolesnikov A. A. *Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza* (Synergy methods of management of difficult systems: theory of system synthesis), Moscow, KomKniga, 2005 (in Russian).

2. **Nasar S. A.** *Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics* (Schaum's Outline series), McGraw-Hill, 2007.
3. **Makarov V. G.** *Analiz sovremennogo sostojanija teorii i praktiki asinhronnogo jelektroprivoda* (Analysis of the current state of the theory and practice of the asynchronous electric drive), *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2011, no. 6, pp. 109—120 (in Russian).
4. **Samarskij A. A., Mihajlov A. P.** *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* (Mathematical simulation: Ideas. Methods. Examples), Moscow, Fizmatlit, 2002 (in Russian).
5. **Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D.** *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Wiley-IEEE Press, 2002.
6. **Krishnan R.** *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001.
7. **Patent** 2400006 Rossijskaja Federacija, MPK7 H 02K 16/02 *Jelektricheskaja mashina* (Electrical machine) / Savinyh A. B., Bukanova T. S.; заявитель i patentoobladatel' GOU VPO Marijskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. № 2009104680/28; заявл. 11.02.2009; opubl. 20.09.2010, Bjul. № 26. 8 s. (in Russian).
8. **Bukanova T. S., Aliev M. T.** *Mikropocessornaja sistema jelektpoprivoda na osnove dvuhpotopnoj jelektpicheskoy mashiny s differencial'nym upravleniem* (Microprocessor system of the electric drive on a basis dvukhrotornoy the electric car with differential management), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 106—110 (in Russian).
9. **Bukanova T. S.** *Sposob upravlenija i model' jelektricheskoy mashiny s differencial'nym tormozheniem* (Sposob of management and model of the electrical machine with differential braking), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 10, pp. 21—27 (in Russian).
10. **Bukanova T. S., Savinyh A. B., Aliev M. T.** *Algoritm upravlenija jelektpoprivoda s differencial'nym tormozheniem* (The control algorithm of the electric drive with differential braking), *Izvestija TulGU. Tehničeskie nauki*, Tula, Publishing house of TulGU, 2012, vol. 5, pp. 120—129 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

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

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 26.06.2018. Подписано в печать 08.08.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН918. 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 "Авансес солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансес солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.